

Tesi di Laurea in Architettura e Composizione Architettonica III  
Corso di Ingegneria Edile / Architettura  
Scuola di Ingegneria e Architettura  
DA - AlmaMater Studiorum - Università di Bologna  
aa - 2013/2014

# mycelium tectonics

STUDIO DI COMPORTAMENTI MORFOLOGICO-COSTRUTTIVI  
ATTRAVERSO SISTEMI BIOLOGICI E SIMULAZIONI AL COMPUTER

Candidato: Gianluca Tabellini

Relatore: Prof. Alessio Erioli

Correlatori: Prof. Alessandra Zambonelli  
Maurizio Montalti  
Philip Ross



## **mycelium tectonics**

STUDIO DI COMPORTAMENTI MORFOLOGICO-COSTRUTTIVI  
ATTRAVERSO SISTEMI BIOLOGICI E SIMULAZIONI AL COMPUTER

Gianluca Tabellini

Tesi di Laurea in Architettura e Composizione Architettonica III  
Corso di Ingegneria Edile / Architettura  
Scuola di Ingegneria e Architettura  
DA - AlmaMater Studiorum - Università di Bologna  
aa 2013/2014

Relatore: Prof. Alessio Erioli

Correlatori: Prof.ssa Alessandra Zambonelli . Laboratorio di Micologia Applicata,  
DipSA - Dipartimento di Scienze Agrarie, UniBo  
Maurizio Montalti . Officina Corpuscoli  
Philip Ross . MycoWorks

aprile 2014 - marzo 2015



# contenuti

---

pag.	005	abstract
	007	introduzione
	<b>1.0</b>	<b>premesse architettoniche</b>
	011	1.1 tettonica
	015	1.2 sistemi auto-organizzati
	019	1.3 intelligenze collettive
	023	1.4 fibre & ornamento
	<b>2.0</b>	<b>studi biologici</b>
	027	2.1 il micelio
	031	2.2 strategie di crescita
	039	2.4 reference
	048	A - arte in vitro
	<b>3.0</b>	<b>ricerca</b>
	051	3.1 esperienza di laboratorio
	056	3.1.0 inVitro mycoTests 00
	062	3.1.1 inVitro mycoTests 01
	066	3.1.2 inVitro petriMask
	074	B - a processing code
	080	3.1.3 (bio)plastic Benchmark
	084	C - inoculo
	086	3.1.4 (bio)plastic & fiber
	094	3.1.5 hemp Benchmark 3D
	102	3.1.6 (bio)analogic computation
	108	3.1.7 wall & mix Benchmark
	<b>4.0</b>	<b>simulazioni e modelli finali</b>
	119	4.1 living fiber
	157	conclusioni
	161	bibliografia



# abstract

---

*Mycelium Tectonics* è un lavoro multidisciplinare che interseca l'architettura con la biologia e con la tecnologia. Il concetto di tettonica - qui definito come il territorio in cui si costruiscono le relazioni tra l'organizzazione formale e i processi di funzionamento endogeni - viene indagato partendo da un punto di vista materico, dai limiti fisici e meccanici della materia e dalle differenze che ne possono emergere attraverso il cambio di scala. Procedendo dunque dal basso, sono stati studiati fenomeni quali l'auto-organizzazione e le intelligenze collettive, costituite da elementi con comportamenti autonomi, in cui l'organizzazione globale non è pianificata a priori ma emerge dalle interrelazioni degli elementi stessi. Si è tentato di descrivere una tettonica in cui fosse proprio la differenziazione e la variazione, di cui il sistema è intrinsecamente capace, a produrre una propria forma di organizzazione tettonica ed estetica su cui la funzionalità potesse essere mappata in modi non convenzionali. La biologia fornisce in questo diversi stimoli circa il concetto di costruire in termini di articolazione spaziale e adattabilità: in natura ogni struttura viene generata mediante processi di crescita intrinsecamente coerenti, e le relazioni che la regolano rendono impossibile scindere le parti dal tutto; una logica profondamente differente dai processi produttivi - e costruttivi - odierni, che racchiude in questo il potenziale per superarne i limiti.

L'esperienza di laboratorio ha permesso un'indagine approfondita sulle capacità esplorative e di morfogenesi del micelio: un organismo pluricellulare molto semplice formato da numerosi filamenti (ife), capaci di ramificarsi e riconnettersi tra loro per formare una rete biologica di trasporto. Le strategie messe in atto durante la crescita, poi simulate digitalmente, si sono evidenziate durante tutto il percorso di ricerca pratica, fornendo non solo motivo di dibattito teorico, quanto stimoli e possibilità a livello operativo. Partendo dagli esperimenti in vitro, lo studio si è poi soffermato sulla possibilità di far crescere il micelio (della specie *Pleurotus Ostreatus*) su strutture fibrose di canapa. Queste sono state simulate ed indagate digitalmente, al fine di costruire prototipi fisici da far colonizzare attraverso una crescita controllata del micelio. I modelli, lasciati essiccare, mostrano caratteristiche e performance emergenti, coerentemente alle premesse architettoniche.

Considerando i risultati - seppur parziali - dell'attività teorico-sperimentale condotta, diviene necessario considerare un significato più esteso del termine sostenibilità, oltre ad un esame più approfondito delle ripercussioni a scala ecologica conseguenti l'applicazione di soluzioni qui soltanto ipotizzate.



E' difficile avere un pensiero critico architettonico contemporaneo quando si viene costantemente bombardati da informazioni/progetti/modelli/idee ad una velocità che nettamente supera le nostre capacità percettive. Eppure sono proprio le informazioni e le relazioni che hanno iniziato da qualche tempo a regolare la società ad ogni livello di scala. Non più il singolo individuo a governare quelli che sono i funzionamenti di un sistema, bensì sono i comportamenti che emergono dalla collettività ad aver acquistato sempre più valenza ed importanza. Basti pensare ai *social network* in cui l'apparente desiderio del singolo di appropriarsi di una propria unicità e singolarità viene vanificato quando si inizia a prendere in considerazione l'enorme quantità di dati disponibili. Questi dati, queste relazioni, hanno una valenza economica e sociale esponenzialmente più rilevante rispetto al singolo individuo: gusti, moda, interessi e tantissime altre variabili vengono intrecciate e filtrate a seconda della necessità e degli scopi.

Nel 1999 Steven Johnson scriveva *Emergence*: un viaggio alla scoperta della complessità intrinseca in sistemi auto-organizzati quali le colonie di formiche, le città, nonché i primi approcci ad un Web dinamico<sup>1</sup> che prendesse in considerazione l'enorme potenzialità data dagli utenti stessi, non più visti come semplici soggetti da raggiungere. Ma l'aspetto più affascinante è l'intima somiglianza tra i meccanismi emersi grazie alle possibilità tecnologiche e quelli che invece sono sempre stati funzionamenti biologici. Le formiche di S. Johnson e i *boids* di C. Reynold<sup>2</sup> non sono altro che la stessa cosa: agenti che seguono poche semplici regole ed interagendo tra loro danno origine a sistemi intelligenti, efficienti ed emergenti.

Immaginate di poter vivere in un edificio che sia emerso dalla interazione tra processi biologici e tecnologici. Un edificio che trovi inizialmente il modo di costruirsi mediante processi di auto-organizzazione dipendenti dal sito in cui si trova, ma anche capace di acquisire una propria autonomia dopo la posa della "prima pietra" e capace di poter essere utilizzato nel mentre che continua a crescere. Un edificio capace di adattarsi alle condizioni climatiche e crescere quando sia necessario più spazio o irrigidire la struttura in maniera di-

<sup>/1</sup> Uno dei primi episodi di interattività Web, come racconta Johnson, fu Slashdot: un raccogliitore di news basato sul rating degli utenti. Era il 1997.

<sup>/2</sup> Craig Reynolds, nel 1986, formulò un algoritmo di intelligenza artificiale che simulasse il comportamento degli uccelli in volo, tuttora la base dell'intelligenza di sciami





\_f00

**ROOT BRIDGE** Cherrapunji, India.  
<http://goo.gl/KSoA7d>

namica a seconda del carico a cui è sottoposto. Non produce nessun tipo di scarto durante la crescita (o la costruzione) e può disassemblarsi quando si sono esauriti gli anni di vita utile. Chiaramente è difficile immaginarsi un tale edificio senza prendere in considerazione l'aiuto di metodi costruttivi sostenibili e la possibilità che possa rimanere adattabile a nuove funzioni, così come poter ospitare sempre più abitanti a livello di configurazione urbana. Quasi fosse un albero: lo spettro è limitato - come lo spostamento ad esempio - ma l'adattamento è ancora possibile. Una costruzione di questo tipo potrebbe unirsi e collegarsi alle altre per creare strutture urbane continue, ognuna con la propria funzione ma facenti tutte parte di un unico grande organismo.

Non so quanto questo possa aver a che fare con quello che immaginavano i Metabolisti<sup>3</sup> con il loro modello di città del 1960. Eppure è chiaro quanto la tecnologia ci permetta sempre più di avvicinarci alla natura, di simularne i comportamenti, l'adattabilità e l'efficienza.

Tanti sono gli studi e i progetti basti sulla biomimetica, ovvero il miglioramento di attività e tecnologia ispirandosi a modelli provenienti da comportamenti e processi biologici. Ma le attente riflessioni di J.M. Benyus<sup>4</sup> sul tema interessano incredibilmente un ampio spettro di fattori: non solo aspetti puramente meccanici ed energetici ma anche attività come l'agricoltura potrebbero funzionare in maniera molto più simile a quelli che sono i caratteri degli ecosistemi, piuttosto che essere guidati per lo più da leggi economiche e di guadagno.

Su questa linea, anche in architettura, sempre più tentativi sono stati fatti per integrare la natura nell'ambiente costruito. Superfici architettoniche intelligenti, che possono reagire ed interagire con il proprio ambiente, sono già parte dello scenario odierno così come lo sono la coltivazione di verdura, grano o alberi da frutta nello spazio urbano.

Qui la sostenibilità, le energie rinnovabili, le tecniche costruttive basate su metodi di lavorazione a controllo numerico, i materiali sofisticati o i sistemi digitali interattivi gioca-

**/3** Il movimento metabolista prese piede in Giappone agli inizi degli anni '60. L'intento era quello di scostarsi dal tradizionale modello statico di città verso edifici e strutture urbane flessibili e mutevoli che potessero adattarsi ad una società in continua trasformazione.

**/4** In Biomimicry di J.M. Benyus un intero capitolo è dedicato all'analisi dell'attuale funzionamento dell'agricoltura e alle possibili alternative che permettano di produrre il quantitativo necessario di cibo (la popolazione sta crescendo enormemente!) senza portare alla distruzione del suolo coltivato.

no tutte un ruolo importantissimo. Come risultato dell'idea di "*living architecture*" ecco che diventa indispensabile il paradigma della biologia. Nondimeno, le tecnologie costruttive odierne mostrano piccoli segni che questi approcci possano veramente essere implementati.

Un edificio è costruito un passo alla volta grazie a strumenti che permettono di aggiungere materiale strato per strato. A livello sperimentale, nuovi metodi di produzione vengono costantemente indagati negli scenari di ricerca architettonica, orientandosi su approcci non convenzionali nel concepire ed indagare lo spazio costruito. In natura ogni struttura viene generata mediante processi di crescita che operano in maniera profondamente differente dai nostri processi costruttivi odierni.

E' solo grazie all'emergenza di tecnologie computazionali che queste scienze possono essere integrate in architettura e nel design. Negli esseri viventi la crescita avviene a livello cellulare, producendo un accrescimento esponenziale. I processi di crescita negli organismi dipendono dal pool genetico, inclusi i principi base dell'auto-organizzazione, ma sono anche influenzati in maniera significativa da fattori ambientali esogeni, e questo è il principio chiave per una crescita adattiva. In forme più complesse di vita invece, la crescita è anche caratterizzata dalla differenziazione: le cellule presentano varie dimensioni, forme, metabolismi e risposta a determinati stimoli. Le cellule differenziate lavorano insieme per generare unità funzionali come i tessuti o gli organi. La base per tutti i tipi di crescita è il metabolismo in ambiente stabile, trovandosi così in equilibrio.

"Crescita" però significa anche miglioramento del materiale e/o dello spazio e in architettura ciò può apparire a diverse scale. Nel campo del progetto urbano, i processi di crescita sono facilmente comparabili con quello che si trova in natura. Diviene però più interessante cominciare a integrare queste logiche anche alla scala dell'edificio o, piuttosto, a quella dei sistemi materiali. Studiare cioè la generazione di forma a partire dalle caratteristiche e proprietà di uno specifico materiale e di cosa possa emergere al cambiamento di scala o attraverso l'esplorazione di logiche aggregative. All'opposto di questo, i prodotti tecnologici odierni sono solitamente manufatti prodotti tramite sottrazione di materiale durante il quale spesso molto materiale viene sprecato. Gli elementi individuali risultano così molto semplici e la rifinitura (in termini di aumento di complessità) spesso non è raggiunta per motivi economici. Ma quando la geometria non è più imposta sulla forma, bensì è la materia che tenta di regolarla, diversi sono gli scenari che si rimettono in discussione e necessitano di essere nuovamente indagati.

---

# PREMESSE ARCHITETTONICHE

---

La definizione di tettonica ha cambiato spesso volto da quando Bötticher e Semper<sup>1</sup> l'hanno teorizzata verso la seconda metà 1800. Ad oggi però, dopo quasi 150 anni, è difficile poter dire di essere arrivati ad un sintesi universalmente condivisa. Si potrebbe obiettare domandandosi "perché, qual è la definizione di architettura?". Senza troppa retorica diventa chiaro che il definire alcuni concetti è una questione mutevole, temporale, legata al pensiero dell'uomo e al suo essere contestualizzato in un'epoca ben precisa. Eppure c'è un aspetto dicotomico che permane nella storia delle definizioni: il tentativo di legare la costruzione, l'ordine strutturale e funzionale, alla sfera dell'arte, di carattere più umano, comprendente talvolta connotati figurativi o simbolici, e talvolta aspetti più decorativi, ornamentali ed estetici. Ma è solo rinunciando a questa forte dicotomia che la tettonica può veramente descriversi come relazione tra i meccanismi endogeni e la morfologia che ne consegue.

Etimologicamente parlando, e non solo, la teoria tettonica e l'architettura sono intimamente legate. Il termine tettonica deriva dal greco: *tektonikos*, che appartiene alla costruzione e *tekton* che invece significa costruttore, carpentiere, con riferimenti all'abilità manuale di colui che opera. Parafrasandolo è interessante poterlo interpretare come l' "arte del costruire", dell'assemblare - attività artistica e artigianale insieme - generalizzando il concetto ed espandendo la definizione ad oggetti di scala differente da quella architettonica<sup>2</sup>.

Lo studio dell'architettura greca ha permesso a Karl Bötticher di definire le nozioni di *kernform* e *kunstform*; il primo si riferisce al sistema strutturale, incapace se preso singolarmente di descrivere se stesso e il contesto culturale in cui è inserito, mentre il secondo è ciò che ha il compito di esprimere e spiegare l'architettura. La trave del tempio greco (*kernform*) si arricchisce con il triglifo (*kunstform*).

La dicotomia di Bötticher passò attraverso le definizioni di Semper, di Frampton<sup>3</sup> o di Wölfflin, che nel 1886 affermò: "*The opposition between matter and force of form...is the principal theme of architecture*".

Ed è vero che è un tema fondamentale, ma è proprio avvicinandosi alla materia e ai suoi limiti fisici, che questa sorta di opposizione svanisce così come viene a sfocarsi la dicotomia tra struttura ed ornamento.



**LAMPADA** da tavolo  
Peter Behrens, 1902

**/1** A Gottfried Semper (1803-1879), con la teoria dei 4 elementi, viene attribuita la prima trattazione sul termine tettonica.

**/2** La nozione di Tettonica proposta da Müller nel 1850 riuniva l'insieme degli oggetti prodotti dalla mano dell'uomo, dal vaso all'edificio, riferendosi a tutte quelle arti che danno origine ad una forma.

**/3** Kenneth Frampton (1930) in *Rappel à l'ordre: The Case For The Tectonic* (1990) ricalcò l'aspetto dicotomico della tettonica, definendo il *kunstform* come un aspetto "poetico" della costruzione, ma addirittura subordinato alla struttura.

Convenzionalmente il limite della materia appartenente ad una geometria ideale è basato sulla nozione che la materia è senza forma ed è la geometria invece che la regola. La geometria viene così vista in maniera trascendentale e totalmente indifferente al materiale che la costituisce. Librandosi da queste concezioni essenzialiste, si inizia a considerare la materia in funzione delle caratteristiche e capacità che mette in mostra, come per esempio l'auto-organizzazione. In questo senso, grazie alle possibilità date dai propri limiti e tolleranze, la materia diviene molto più dinamica e ricca che una qualsiasi geometria progettata o un qualsiasi principio di ottimizzazione. Diviene un modello che non solo si interfaccia alla struttura ma si regola in funzione di tutti quei feedback che intercorrono tra le molteplici forze che contaminano la costruzione, il programma funzionale, l'uso, l'articolazione spaziale e la forma.

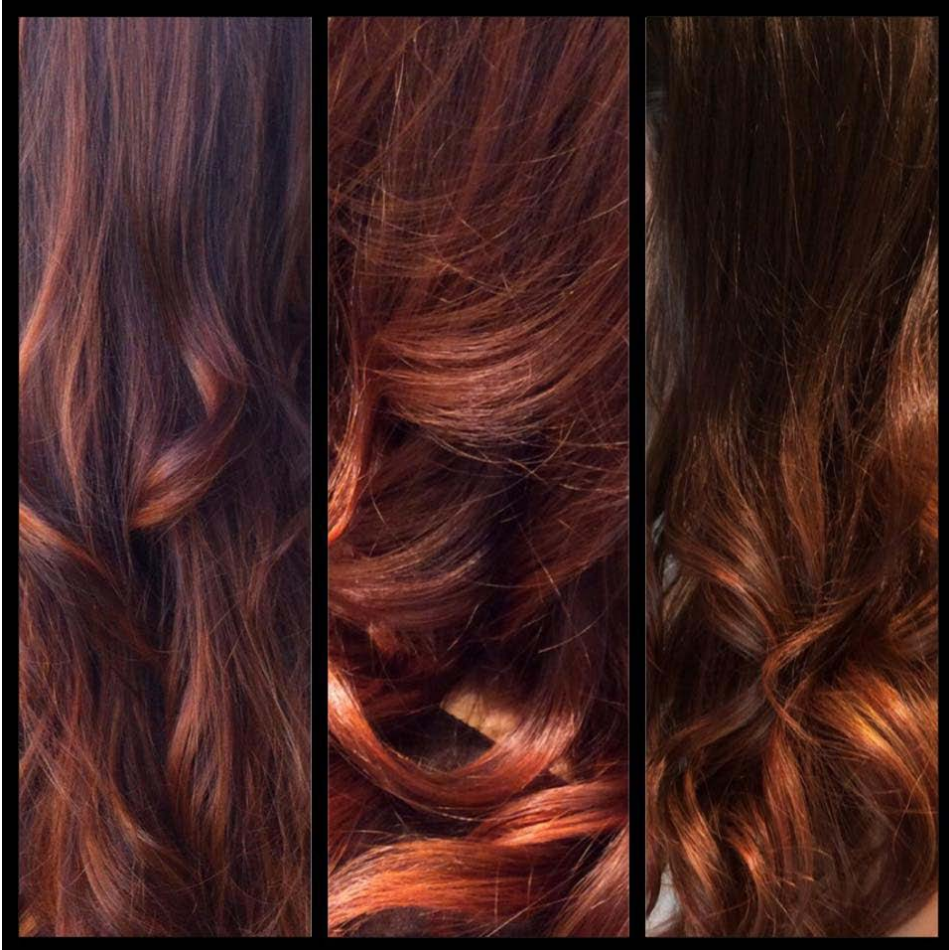
La tettonica dunque diviene ciò che relaziona la morfologia alla fisiologia di cui il carattere estetico viene intrinsecamente inglobato. Non più gerarchie architettoniche indipendenti e sovrapposte ma un *continuum* caratterizzato dalla differenziazione e variazione.

I sistemi biologici in questo offrono spunti riflessivi sul concetto di costruire e sulle relazioni che intercorrono tra struttura ed estetica, funzionalità e forma. La simulazione di alcuni comportamenti, tra cui troviamo le intelligenze collettive, hanno permesso di inquadrare la tettonica in un contesto digitale: attraverso la simulazione al computer si aprono prospettive circa la possibilità di generare la forma coerentemente con le forze strutturali - e culturali - in atto.



**\_f02**  
**JOINT** by Arup,  
acciaio stampato in 3D  
© David de Jong





f03  
© Koy's parrukkieri

***“Quantity has a quality all its own”  
Joseph Stalin***



# sistemi auto-organizzati

---

## 1.2

Negli ultimi 20 anni la rappresentazione del nostro ambiente ne ha profondamente modificato la percezione dando vita a nuove e più profonde sensibilità. Lo studio della terra dallo spazio, per esempio, ha decisamente aumentato la nostra consapevolezza sulle dinamiche climatiche, di tettonica e sul fragile equilibrio dei flussi che caratterizzano il nostro pianeta. La microfotografia invece ha rivelato dettagli meravigliosi di tantissimi piccoli organismi e il fine bilanciamento delle loro performance in relazione alla specifica scala e contesto ambientale. Ora ci sono nuove rappresentazioni e tecniche di simulazione mirate ad approfondire i processi di auto-organizzazione e crescita, entrambi influenzati dalla presenza di stimoli esterni.

Tutti i sistemi naturali, dal più grande al più piccolo, mostrano un alto livello di integrazione e funzionalità che derivano sia da continue relazioni di feedback dinamico<sup>1</sup>, ad esempio di uno specifico organismo con il suo ambiente, sia dalle capacità del sistema stesso di mettere in moto meccanismi di adattamento e organizzazione della materia.

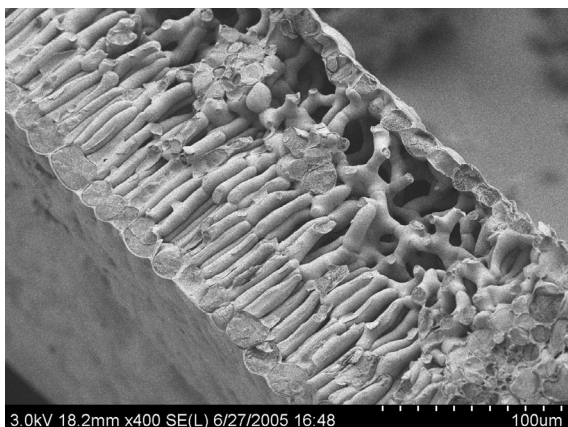
I processi di auto-organizzazione che stanno alla base della crescita degli organismi viventi possono fornire interessanti stimoli per fondare nuovi paradigmi sul concetto di "costruire". Per fare ciò si necessita un coinvolgimento profondo con lo sviluppo evolutivo e un'analisi sistematica dell'organizzazione materica e dei comportamenti di ognuna specie.

Con auto-organizzazione si intende quel processo mediante il quale l'organizzazione interna di un sistema si adatta all'ambiente per favorirne una specifica funzione senza venire guidato o regolato dall'esterno. In biologia questo include tutti quei processi di sviluppo biologico quali lo studio sulla crescita e sviluppo degli organismi, la comprensione del controllo genetico delle cellule di crescita, processi di differenziazione e morfogenesi.

Il funzionamento dell'auto-organizzazione biologica si basa dunque su piccoli, semplici componenti assemblati tra loro in uno schema tridimensionale per formare una organizzazione più ampia capace di dare origine ad una struttura complessa che presenti comportamenti e proprietà emergenti<sup>2</sup>. Nel tessuto umano, per esempio, il comportamento meccanico della pelle segue queste logiche. Presa una parte di pelle e tirata, questa resiste allo sforzo diventando più rigida; se poi lasciata andare torna a rilassarsi. Quando la pelle viene stirata la sua resistenza aumenta in maniera proporzionale

**/1** Feedback o retroazione è quella risposta del sistema a variazioni delle condizioni esterne che tende a mantenere l'equilibrio -feedback negativo- o che invece tende a discostarsene permettendo il cambiamento e l'evoluzione verso nuove condizioni di equilibrio -feedback positivo-. Per approfondire un ottimo contributo al tema è stato dato da Manuel DeLanda in "Mille anni di storia non lineare".

**/2** Quando l'effetto globale di un sistema è maggiore della somma degli effetti delle parti costituenti il sistema prese singolarmente, si parla di olistismo. Il pensiero olistico nasce in Occidente nel XVII secolo ma presenta radici profonde in tutte le filosofie Orientali a partire addirittura dal VI secolo a.C.



#### W4

**FOGLIA** di noce congelata, microscopio SEM,  
SFB-TRR 141 <http://www.trr141.de/>

allo sforzo perché sempre più componenti della pelle si dispongono nella stessa direzione dando origine ad una risposta allo sforzo chiamata irrigidimento lineare.

Le strutture biologiche sono dunque sistemi all'interno di sistemi: distribuzioni gerarchiche dovute ad una semi autonoma organizzazione, ognuna delle quali raggiunge la sua specifica funzione ma allo stesso tempo contribuisce alla reattività dell'organizzazione globale. Per raggiungere ciò ogni livello di organizzazione necessita di differenziazione e ridondanza.

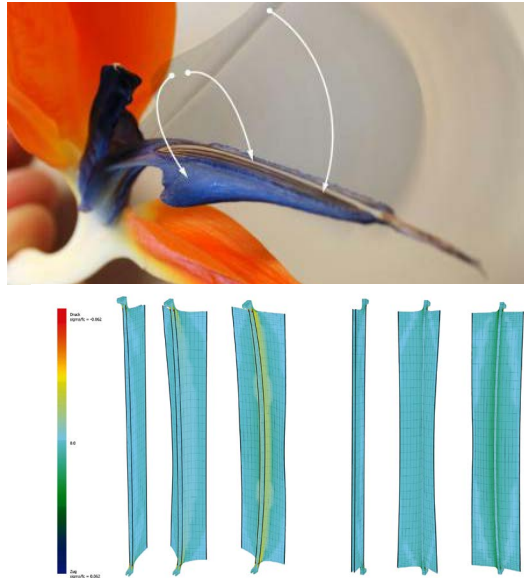
I sistemi biologici sono tutti auto-assemblati: usano principalmente poco materiale per creare forti strutture, e le loro risposte dinamiche e proprietà sono molto differenti da quelle concepite nell'ingegneria classica delle strutture fatte dall'uomo. Così come molte piante crescono laddove le condizioni sono favorevoli, indipendentemente dall'entità della superficie su cui crescono, così gli elementi costruttivi potrebbero essere distribuiti a seconda di criteri basati sull'efficienza, piuttosto che continuare ad essere considerati, in maniera piuttosto limitativa, semplicemente una soglia tra interno ed esterno.

In generale questo approccio dà vita a un modo differente di comprendere l'ambiente costruito e le relazioni che lo regolano. Ci si discosta da quella che è la somma di elementi discreti verso una più sinergica interrelazione con l'ambiente sensibile, dove i processi costruttivi diventano processi di crescita orientati al miglioramento delle *performance* e altamente dipendenti dal luogo e dal tempo. In altre parole: "*site and time specific*".

Dunque, incamminandosi verso paradigmi di differenziazione e multi-performance in architettura, è interessante prendere in considerazione la possibilità di modellare i comportamenti biologici influenzati dall'ambiente che lo ospita. Di grande interesse ed importanza è il lavoro portato avanti da Przemyslaw Prusinkiewicz - e l'università di Calgary - nella programmazione di algoritmi che simulano la crescita delle piante. Attraverso queste investigazioni è possibile ricavarne strategie progettuali e metodi direttamente influenzati da specifiche condizioni ambientali e, perciò, di

**/3** Questo fenomeno avviene grazie a continue relazioni di feedback che intercorrono tra ciò che sta crescendo e l'ambiente che lo circonda.

**/4** Non si pensi alla "sostenibilità" solo in termini di riciclo o biodegradazione. Il vantaggio di differenziare un materiale al fine di ottenere un componente edilizio altamente performante in funzione di quelle specifiche condizioni di carico può significare una grande ottimizzazione sulla quantità di materia necessaria. Evitare gli sprechi è una forma di sostenibilità.



\_f05

**FLECTOFIN®** itke

<http://www.trr141.de/wp-content/uploads/2014/09/H01602.jpg>

raggiungere avanzati livelli performativi e di funzionalità. Ad esempio è possibile far sviluppare una pianta in maniera completamente digitale tale che la sua “crescita” avvenga in accordo con stimoli ambientali<sup>3</sup>. Ogni cambiamento nel campo degli input genera differenti risultati di crescita, in altri termini una differente articolazione spaziale.

Il comportamento di tutti i sistemi naturali è complesso e adattivo, e le piante in particolar modo organizzano i loro comportamenti strutturali tanto da fornire nuovi modelli per l'ingegnerizzazione di strutture. Resistono per esempio alla gravità e ai carichi del vento attraverso la variazione della sezione dello stelo e all'organizzazione del materiale in successive gerarchie di compattezza/densità/distribuzione al fine di raggiungere alti livelli di *performance*.

Quello che si può imparare da queste nuove metodologie non riguarda solo la sensibilità relativa ai processi di visualizzazione, bensì attenzione alle specifiche configurazioni e caratteristiche degli strumenti a disposizione e del loro potenziale contribuito negli approcci che tentano di ripensare al design seguendo e strumentalizzando le logiche di auto-organizzazione. In questo senso è possibile sviluppare metodi e strumenti nel quale le caratteristiche progettuali siano incorporate all'interno di un *setup* parametrico, il quale viene simultaneamente influenzato da uno specifico contesto ambientale e materiale. L'organizzazione metodologica, il set di strumenti e le scelte della determinazione delle variabili diventano perciò ugualmente importanti durante la progettazione architettonica, verso una prospettiva senz'altro a vantaggio della sostenibilità.





# intelligenze collettive

1.3

Progettare tramite le logiche di intelligenza a sciame, attraverso algoritmi non-lineari detti “multi-agente”, significa codificare semplici decisioni architettoniche all'interno di un sistema distribuito di agenti computazionali autonomi<sup>1</sup>. L'iterazione di questi agenti, le relazioni che li legano e le loro decisioni locali generano auto-organizzazione, facendo sorgere intelligenze collettive e comportamenti emergenti a scala globale. Queste rappresentazioni, o meglio “modelli”, spostano l'attenzione da una organizzazione e progettazione esplicita della forma verso un'orchestra di processi di formazione intensivi che permettono di sottolineare i comportamenti della materia.

Nel campo dell'architettura, il design computazionale può essere suddiviso e descritto attraverso diverse categorie: la modellazione parametrica, l'ottimizzazione, il *form finding* e gli algoritmi generativi. Le prime tre si riferiscono al concetto di stabilità, dunque alla ricerca di equilibrio grazie ad un continuo adattamento dei comportamenti o della forma in risposta a relazioni di feedback. La dicotomia dei sistemi lineari e non-lineari però - per quanto siano concetti chiave - non è sufficiente a descrivere caratteri quali l'indeterminazione o il rischio nel processo di progettazione, che possono invece essere ben più precisamente definiti dall'opposizione di stabilità e indeterminazione. Ecco che l'ultima categoria - gli algoritmi generativi - mostra tutto il potenziale dei sistemi complessi<sup>2</sup>.

I modelli parametrici che hanno invaso l'architettura contemporanea sono descritti dalle relazioni lineari che intercorrono tra un parametro e la conseguente trasformazione geometrica. Questo ha permesso un controllo preciso e di grande flessibilità sul modello digitale ma è curioso come questo strumento di controllo sia invece diventato uno strumento proprio della progettazione. I parametri confinano il modello stesso ad un conosciuto numero di limiti, intrinseci nelle condizioni iniziali del sistema, allontanandosi dalle possibilità tettoniche proprie invece dei processi di crescita e morfogenesi. Ecco che gli algoritmi generativi, innescando procedure ricorsive e di auto-organizzazione, diventano cruciali per l'esplorazione della complessità nel design computazionale. Il loro ruolo rimane abbastanza diversificato in



\_f06

YUANSU-II by ren ri,

[www.artrepublic.com/2014/07/200038/yuansu-ii](http://www.artrepublic.com/2014/07/200038/yuansu-ii)

**/1** Un *agente* è un elemento mobile di un sistema a cui vengono assegnate specifiche regole comportamentali e di iterazione con gli altri elementi o con l'ambiente in cui si muove. Gli uccelli in volo, le formiche, o gli apici delle ife di un micelio possono essere considerati agenti che danno origine a intelligenze collettive.

**/2** Roland Snooks, “Volatile Formation”, Log 25, Summer 2012

architettura in quanto la rilevanza di questi algoritmi è strettamente dipendente dall'abilità di decodificare l'intento architettonico da parte del progettista. Molto spesso gli algoritmi generativi vengono semplicemente impiegati come modelli o schemi per l'architettura; generatori di forme astratte che operano senza preoccuparsi di riconoscere i problemi o le proposizioni architettoniche.

Come suggerisce Roland Snooks in "*Volatile Formation*", se il design computazionale fornisce il quadro all'interno del quale ripensare l'architettura attraverso paradigmi non lineari, allora è abbastanza riduttivo applicare semplicemente "l'immagine della complessità al corpo della modernità".

E' forse questa attitudine che contribuisce alla percezione che gli algoritmi in architettura affrontino solo questioni formali ed estetiche, quando invece offrono tutto il potenziale per progettare inerentemente agli aspetti di organizzazione gerarchica e tettonica, come programma e struttura. I sistemi complessi sono ugualmente adatti per creare forma, così come l'emergere della forma può essere interpretata come organizzazione di materia.

L'auto-organizzazione, all'interno dei modelli chiamati da Snooks "*behavioral formation*"<sup>3</sup>, genera caratteristiche emergenti in una maniera non differente da tanti algoritmi generativi non lineari, ma quello che li differenzia è la natura architettonica delle regole dalle quali le caratteristiche emergono: queste vengono interpretate come uno specifico intento progettuale. Si tratta di generare specifici comportamenti architettonici, attraverso l'interazione locale di precise intenzioni progettuali; in altre parole: tettonica.

Questi agenti vengono quindi decodificati come elementi geometrici quali i vettori, componenti, superfici, in risposta a flussi locali, densità, prossimità e direzioni della geometria. La loro recettività non si basa ne su specifiche richieste architettoniche ne su regole astratte e sperimentali estrapolate da ciò che può emergere a livello globale. Questi due modelli operano solitamente in parallelo e solo attraverso entrambi le caratteristiche emergenti ad un macro livello possono evidenziarsi a partire dai sistemi auto-organizzati.

Mentre le procedure provenienti dagli algoritmi sono capaci di generare risultati emergenti diretti, la difficoltà dei sistemi multi-agente di comprendere sufficientemente la topologia è però mediata dall'esplicito intento del progettista. Questo richiede un instancabile, reiterato torturarsi sul modello editando, estraendo, manipolando e reinserendo il modello stesso nello spazio "volatile" della creazione dell'algoritmo.

Le strategie creative implicano una negoziazione tra le problematiche complesse che emergono in architettura e la relativa ottimizzazione della struttura, del programma, della forma e non meno dell'ornamento; e solo attraverso una articolazione tettonica è possibile estrarre le potenzialità costruttive dei sistemi generativi alla ricerca di nuovi tratti organizzativi e formali.

<sup>3</sup> Roland Snooks definisce Formazioni Comportamentali (*Behavioral Formations*) quelle metodologie di progettazione algoritmiche non-lineari capaci di contaminare con intenzioni architettoniche le interazioni locali di sistemi multi-agente. In dettaglio sono proposte due modalità operative: la prima, centrata su decisioni esplicite conseguenti a feedback non prevedibili, la seconda invece come diretta risposta strutturale.



\_f07

MURMURATION #5, Rome, Italy, 2009

© Paolo Patrizi





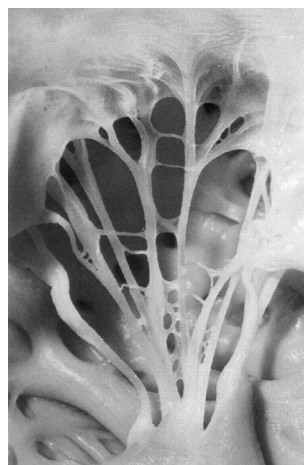
# fibre & ornamento

1.4

Le strategie non-lineari dei sistemi a sciame hanno una radicale influenza sulla generazione di forme, struttura e tettonica. Abbandonare un approccio prevalentemente riduttivo significa discostarsi dall'idea che l'articolazione delle varie gerarchie architettoniche sia inevitabilmente discreta. La natura "*bottom-up*"<sup>1</sup> di questi sistemi rifocalizza le questioni riguardanti la tettonica verso un assemblaggio a micro-scala, permettendo approcci progettuali attraverso diverse scale, dalla composizione del materiale alle macro-forme. In questo modo, piuttosto che studiare un dettaglio come una fine risoluzione di un problema ingegneristico, è l'interazione dei comportamenti alla micro-scala che diventa generatore dell'organizzazione e della forma alla macro-scala. Questo approccio viene definito poli-scalare e, tramite logiche organizzative di auto-similarità permette di lavorare come se si fosse all'interno di una ecologia<sup>2</sup>.

Un esempio è la relazione tra la struttura e l'ornamento. Invece che considerare l'ornamento come qualcosa che segua o sia subordinato alla struttura, le relazioni possono essere rifondate in termini di mutua influenza; la struttura influenza l'ornamento e contemporaneamente l'ornamento influenza la struttura. Questo permette alle strutture e all'ornamento di operare come comportamenti all'interno di un singolo corpo materico piuttosto che esistere come elementi o geometrie discrete. L'integrazione di struttura e ornamento all'interno di un singolo materiale è sempre stato presente in architettura, soprattutto in quei periodi architettonici come il gotico, il barocco o il rococò. Fatta eccezione per il primo<sup>3</sup>, a questi movimenti o periodi, rimane comune la natura subordinata dell'ornamento.

Ipotizzare invece struttura e ornamento come un sistema di comportamenti significa prendere in considerazione, a livello microscopico, le regole che ne stanno alla base. L'ornamento in questo caso non diventa semplicemente qualcosa di applicato, bensì viene spinto e tirato tra l'estetica e la materia, privilegiando nessuna delle due, all'interno di un continuo bilanciamento e negoziazione. Perciò, mentre i comportamenti strutturali e ornamentali operano ad una scala molto piccola, la natura di questi comportamenti può essere ben differente. I comportamenti strutturali possono essere interpretati attraverso la distribuzione a fasci delle



**f08**  
**CORDA TENDINEA** nel cuore umano  
sistema fibroso appartenente alla valvola  
mitrale  
Anderson & Becker, 1982

**/1** I processi *bottom-up*, al contrario di quelli *top-down*, sono quei comportamenti in cui l'organizzazione (in questo caso formale) non è imposta dall'alto, ma è frutto di logiche auto-organizzative.

**/2** L'ecologia è lo studio delle relazioni che legano un organismo agli altri esseri viventi e all'ambiente in cui vive. Si cerca dunque di porre l'attenzione alle relazioni che intercorrono tra il materiale, la sua morfologia, i suoi comportamenti, la scala a cui si opera etc.

**/3** Nel gotico ogni elemento è in costante stato di transizione: le colonne diventano volte, le volte finestre, le finestre con i loro arabeschi si fondono nei muri. Ogni movimento scorre fluidamente senza che vi sia alcun ostacolo. Le relazioni tornano in superficie. Sono le relazioni che creano il tutto, non le singole parti.

\_f09

**FIBRE-HOUSE** - Kokkugia, 2012

[http://theoremas-gabe00fab.blogspot.it/2013\\_09\\_01\\_archive.html](http://theoremas-gabe00fab.blogspot.it/2013_09_01_archive.html)



fibre, oppure rendendo gli elementi ondulati o separando i componenti per sviluppare diversità strutturali. I comportamenti degli ornamenti invece operano con un intento più gestuale al fine di generare aspetti intricati ed espressivi. A livello computazionale, ad esempio, l'interazione tra i comportamenti strutturali e quelli ornamentali può avvenire sia attraverso l'interazione di due discrete popolazioni di agenti (uno strutturale e uno ornamentale) oppure come una singola popolazione che sia capace di differenziarsi in maniera locale contestualmente a quelle regole che lo rendono sensibile nel diventare talvolta struttura e talvolta ornamento.

Nei sistemi fibro-compositi non c'è distinzione tra la pelle e la struttura, piuttosto ogni fibra opera a livello strutturale grazie ad un meccanismo ridondante<sup>4</sup> di assemblaggio che integri inevitabilmente anche caratteristiche ornamentali. L'aggregazione di fibre è un processo non-lineare le cui gerarchie di elementi, piuttosto che essere definite a priori come primarie, secondarie o terziarie, emergono dalla variazione di intensità, capacità e densità durante l'assemblaggio stesso. Mischiando così sistemi, come struttura e ornamento, diventa difficile classificare le geometrie così come il concetto di tettonica, in maniera convenzionale.

La progettazione dei comportamenti dei materiali compositi offre pertanto interessanti implicazioni estetiche, concettuali nonché di fabbricazione.



\_f10

**FIBROUS ASSEMBLAGE –**

Multi-Agent drawing

Josef Musil Be Han + Michael Gloudeman

2013 - <http://thefunambulist.net/>

***“When a structural concept has found its implementation through construction, the visual result will affect us through certain expressive qualities which clearly have something to do with the play of forces and corresponding arrangement of parts in the building, yet cannot be described in terms of construction and structure alone. For these qualities, which are expressive of a relation of form to force, the term tectonic should be reserved.”***

**Edward Sekler**

<sup>4</sup> Nell'ingegneria classica la ridondanza è opposta al concetto di efficienza, ma è una strategia essenziale in biologia, senza la quale l'adattamento e la risposta alle pressioni ambientali non sarebbe possibile.

# STUDI BIOLOGICI

---

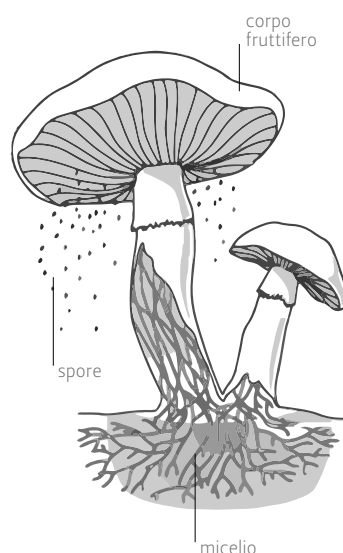
# il micelio

## 2.1

Il micelio è l'apparato vegetativo dei funghi, ovvero l'organismo che quando fruttifica dà origine a quel corpo comunemente chiamato fungo, spesso commestibile, che cresce nel sottobosco. Questi organismi si collocano in una sfera in bilico tra il regno vegetale e quello animale. Il loro carattere eterotrofo<sup>1</sup> li rende diversi dalle piante, le quali assorbono solo acqua e sali minerali dalle radici e riescono a produrre gli zuccheri autonomamente tramite la fotosintesi clorofilliana. Inoltre la principale sostanza di cui sono composti i miceli (tralasciando l'80% di acqua) è la chitina<sup>2</sup>, assolutamente assente nelle piante, che si trova invece soprattutto nell'esoscheletro di insetti, ragni e crostacei. Ma i funghi si discostano anche dal regno animale per la loro impossibilità a spostarsi - ma non a muoversi<sup>3</sup> - e per l'assenza di organi funzionali, apparato riproduttivo a parte. Altre caratteristiche biochimiche distinguono i funghi sia dalle piante che dagli animali (es. l'ergosterolo come steroidi di membrana).

Il micelio è definibile come un insieme di filamenti, chiamati ife, organizzati tra loro per formare una rete ultra-connessa capace di assorbire i nutrienti che sono poi ridistribuiti al suo interno al fine di espandersi e cercare nuove sostanze da decomporre. A differenza di altre reti biologiche di trasporto, come le piante o il sistema vascolare animale, il network creato da questi organismi non è parte dell'organismo, ma è l'organismo stesso<sup>4</sup>; in maniera un po' semplicistica (approfondiremo più avanti) si può sostenere che non vi siano parti differenziate a cui vengano assegnate funzioni specifiche.

Nonostante i funghi siano organismi molto semplici, presentano una biodiversità enorme: nel 1991 erano state scoperte 70000 specie di funghi - con una predizione di 1,5 milioni - e ad oggi si stima ve ne siano invece più di 5 milioni<sup>5</sup>. Una prima distinzione viene fatta attraverso tre grandi categorie, in funzione della strategia usata per procurarsi il nutrimento: i saprofiti, i parassiti e i simbiotici. I primi crescono decomponendo materiale organico già morto quali ceppi di legno, rami o più semplicemente foglie e detriti di piccolo taglio presenti nel terreno. I parassiti instaurano un legame con l'organismo ospite provocandone un graduale indebolimento fino a portarlo molto spesso al decesso. Infine i funghi simbiotici instaurano un legame di mutuo scambio con altri



f11

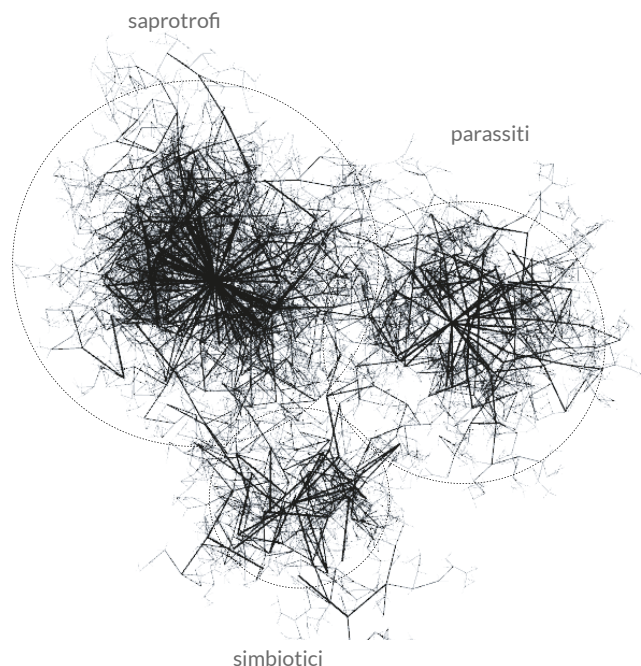
/1 L'eterotrofia è quella condizione nutrizionale di un organismo vivente che non è in grado di sintetizzare le molecole organiche autonomamente da molecole inorganiche. Le piante invece sono dette autotrofe proprio per questa loro capacità.

/2 Un polisaccaride molto simile alla cellulosa costituito da più unità di N-acetilglucosamina.

/3 Stefano Mancuso in "Verde Brillante" tratta in maniera approfondita la differenza tra spostamento e movimento a proposito delle piante.

/4 Heaton, Luke; et al. - "Analysis of fungal networks", 2012

/5 Blackwell, Meredith - "The fungi: 1,2,3 ... 5.1 million species?", 2011



organismi: le micorrize, per esempio, sono funghi che si legano alle radici di alcuni tipi di piante fornendo loro quelle sostanze come azoto, fosforo e potassio che non riescono a sintetizzare da sole e di cui magari il suolo non ne è ricco, mentre la pianta, tramite il processo di fotosintesi, riesce a dare al micelio gli zuccheri utili alla sua crescita.

La decomposizione di materiale organico avviene grazie al rilascio di particolari enzimi capaci di rompere catene polimeriche anche molto complesse (la lignina è una di queste) trasformandole in monomeri semplici e dunque facilmente assimilabili sia dal micelio stesso che da altri organismi animali e vegetali. Questa caratteristica, unica nel suo genere e propria solo del regno dei funghi, ha dirette implicazioni sul ruolo che questi ricoprono nello sviluppo evolutivo e nella regolazione degli ecosistemi.

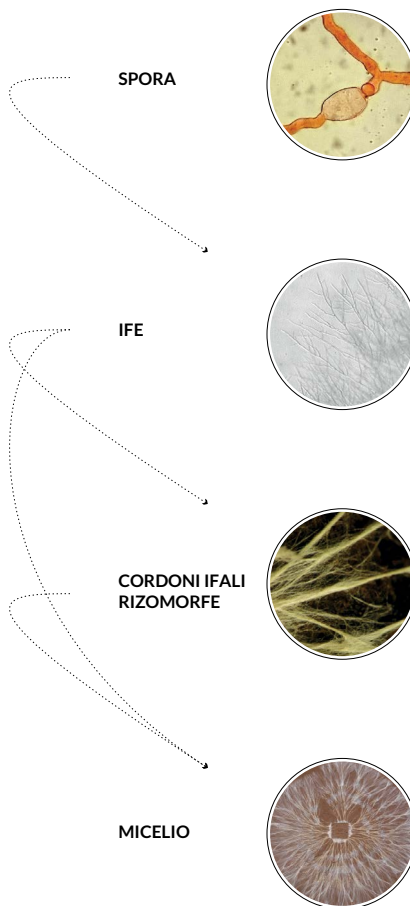
La riproduzione dei funghi avviene tramite le spore: cellule molto resistenti capaci addirittura di sopravvivere alla digestione degli animali o di rimanere inattive per lunghi periodi tempo in attesa che si verifichino le condizioni opportune affinché possano germinare. Quando questo accade danno origine alle prime ife che crescendo e ramificandosi iniziano a formare il micelio. L'altra importante caratteristica dei funghi è la possibilità di moltiplicarsi per clonazione: presa una qualsiasi porzione della colonia fungina e spostata in un altro substrato, questa inizia a crescere dando origine a nuove ife e di conseguenza ad un nuovo organismo biologicamente identico a quello di partenza.



**IFE** le ife possono essere considerate come il componente base che costituisce il micelio; sono filamenti di sezione circolare, unicellulari o pluricellulari, capaci sia di ramificarsi che di riconnettersi tra di loro.

**CORDONI IFALI E RIZOMORFE** In alcune specie di funghi mano a mano che la rete ifale cresce si specializza dando origine ad aggregazioni lineari e orientate di ife chiamate cordoni miceliari o rizomorfe. Questa specializzazione delle ife è volta alla creazione di canali principali molto resistenti e ad alta conduttività che cercano di massimizzare l'efficienza nel trasporto di sostanze. Le rizomorfe sono composte da una *medulla interna* che è un insieme di ife cave dal diametro spesso anche 1/1.5 cm abbastanza rigide, e da una *medulla esterna* composta invece da ife di massimo 2mm di diametro che ricoprono tutta la medulla interna e sono specializzate nell'inibire lo scambio di acqua e nutrimento con l'esterno. Esse assomigliano alle radici delle piante e spesso hanno anche funzioni simili, permettono il trasporto di nutrimento per lunghe distanze o per portarlo al corpo fruttifero. I cordoni miceliari sono simili alle rizomorfe, formati da ife parallele, ma non possiedono ife altamente specializzate.

**MICELIO** Il micelio dunque è un'aggregazione di ife. La forma del micelio però è in continuo cambiamento ed è strettamente legata sia alla ricerca di nuove risorse, sia alle varie strategie di fusione fra ife diverse (le anastomosi), riciclo di materiale, trasporto di nutrienti e ridondanza che il micelio mette in atto durante l'esplorazione del substrato. Questo insieme di valori può essere identificato da un coefficiente (generalmente chiamato alpha) che ne descrive l'andamento e che non è distante dai valori ritrovati in altri tipi di reti come quelle create dalle formiche nelle gallerie o alle infrastrutture urbane di una città.







# strategie di crescita

## 2.2

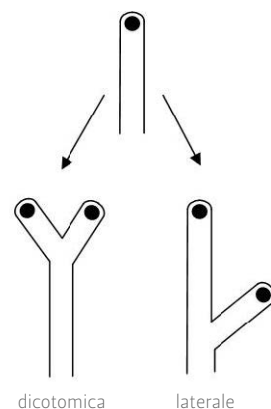
Il micelio si sviluppa come un network adattivo e indeterminato alla ricerca di nutrimento in ambienti imprevedibili e irregolari, con la capacità di adattare molto rapidamente il suo metabolismo nonché le risorse disponibili all'interno della colonia in funzione delle varie domande locali e degli stimoli esterni. Queste strategie lo rendono capace di superare territori ostili per connettere zone ricche di nutrienti ma fisicamente separate tra loro, mantenendo un'integrità a possibili danni o attacchi predatori.

L'adattamento e le strategie sviluppate durante l'evoluzione sembrano strettamente legate a massimizzare il trasporto di materiale all'interno della rete ifale. Ma a differenza dei sistemi vascolari, che ad esempio massimizzano l'efficienza del solo trasporto, bisogna ricordarsi che il micelio è prima di tutto un organismo, quindi tende a trovare sempre un compromesso tra efficienza e sopravvivenza. Questo li rende organismi molto più dinamici. Ogni parte della rete ifale può essere influenzata e influenzare lei stessa l'intero network senza che avvenga un lavoro di stima - giudizio - sul comportamento globale<sup>6</sup>.

Sempre in competizione per via di risorse limitate, il micelio deve rimanere altamente reattivo bilanciando il mantenimento, il riciclaggio, l'esplorazione e l'utilizzo delle risorse. Il risultato mostra dunque intelligenze che operano senza un controllo centrale ma che si servono di principi come l'adattabilità e ridondanza di materiale.

L'insieme di ife derivanti dai diversi processi di aggregazione forma una rete interconnessa che può andare dalla scala di alcuni centimetri nel microcosmo creato in laboratorio a decine di km nei terreni indisturbati come le foreste<sup>7</sup>.

Le due principali caratteristiche che contraddistinguono la crescita del micelio sono la ramificazione e la riconnessione delle ife. La prima, chiamata *branching*, può avvenire o per biforcazione degli apici, oppure lateralmente ad una ifa già formata e sviluppata. La seconda invece viene definita *anastomosi*. Si tratta della fusione di due ife: quando le condizioni lo richiedono, due apici che si trovano entro ad una soglia di prossimità si riconoscono e si fondono dando origine a *loops* ricorsivi all'interno della rete ifale. Questo fenomeno avviene durante una fase cruciale dello sviluppo del micelio e svolge diverse importanti funzioni. E' ormai assodata la



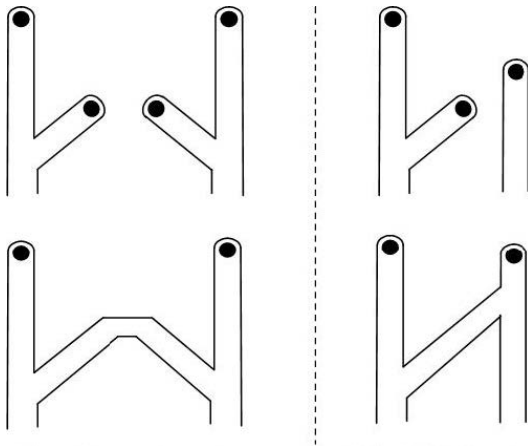
**f13**

Le due tipologie di ramificazione dell'ifa

<sup>16</sup> Non vi è un organo come il cervello a cui sia affidata la funzione di prendere decisioni e dire al resto dell'organismo cosa fare.

Heaton, Luke; et al.- "Analysis of fungal networks", 2012

<sup>17</sup> Paul Stamets in "mycelium running" descrive questa vastissima rete ifale paragonandola ad Internet e cognaendo il termine -"Wood Wide Web"



**f14**

L'anastomosi può avvenire o tra gli apici di due ife diverse oppure tra un apice e una parete laterale dell'ifa.

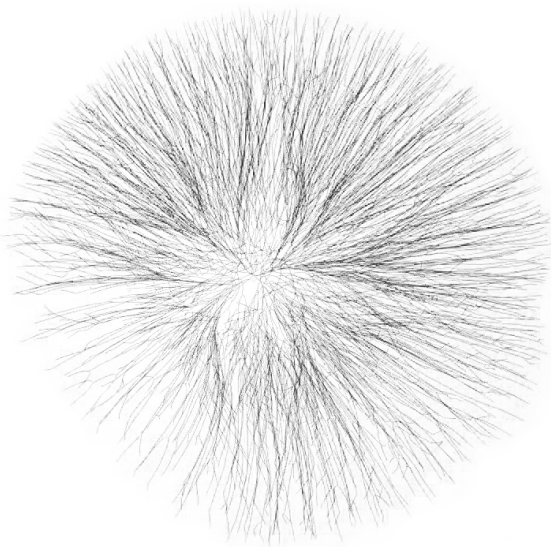
/8 Glass, N. Louise; et al. - "Hyphal homing, fusion and mycelial interconnectedness", 2004

/9 <http://www.botany.hawaii.edu/> - Department Of Botany, College of Natural Sciences, University of Hawai'i at Manoa

/10 Tlalka, M; et al. - "Emergence of self-organised oscillatory domains in fungal mycelia", 2007

**f15**

Risultato di una simulazione digitale. Si veda inserto A, pag 74



sua importanza al fine di permettere la comunicazione tra diverse ife, nonché la traslocazione di acqua e nutrienti e l'omeostasi dell'organismo<sup>8</sup>. Ma ciò non avviene solo all'interno della stessa colonia bensì anche tra diverse colonie provocando la fusione di due organismi diversi in uno unico. L'anastomosi è inoltre implicata nella formazione di aggregati di ife da cui deriva il corpo fruttifero.

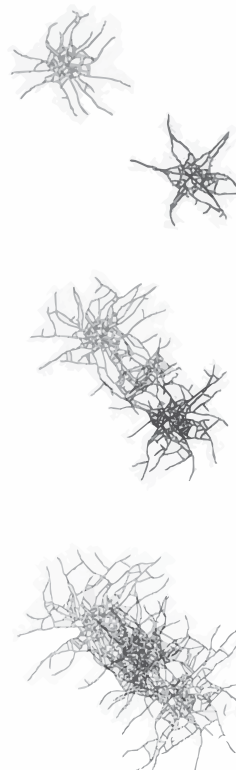
Il meccanismo con cui i miceli assimilano i nutrienti viene chiamato "assorbimento". I funghi sono eterotrofi quindi non si possono produrre il nutrimento da soli attraverso reazioni chimiche, come avviene nelle piante ad esempio, ma dipendono strettamente da altri organismi. Se il nutrimento è composto da molecole semplici come glucosio o saccarosio allora queste sostanze passano attraverso le pareti cellulari delle ife e vengono direttamente immesse nella rete pronte ad essere trasportate. Altrimenti i miceli sono capaci di nutrirsi di molecole molto più complesse, nonché spesso insolubili, come cellulosa, lignina, pectina etc..<sup>9</sup> Per ridurre queste molecole complesse in componenti più semplici, vengono rilasciati nel substrato degli enzimi che rompono e digeriscono le catene di polimeri in monomeri, i quali poi possono essere direttamente assorbiti.

L'essenziale peculiarità di questo sistema digerente è l'assenza di un vero e proprio organo dedicato a questa funzione; la digestione avviene fuori dall'organismo e solo una volta che il cibo è decomposto può essere "mangiato".

Dopo che le varie sostanze e l'acqua vengono assorbite nella rete ifale, il micelio ha la capacità di poter ridistribuire il nutrimento dal centro della colonia alla periferia e viceversa attraverso il fenomeno di traslocazione. Mentre in una colonia giovane il flusso di massa va dalla parte inoculata verso la periferia per incentivare la crescita e la ricerca di terreno ricco di nutrienti, in una colonia già formata inizia a svilupparsi una ridistribuzione dei nutrienti seguendo altre direzioni. Avviene dunque una transizione che permette alla traslocazione di essere bidirezionale, a differenza di tutti gli altri sistemi vascolari animali e vegetali. Vengono così distinte due tipi di traslocazione<sup>10</sup>: quella attiva che entra in gioco nella fase esplorativa dove il flusso di massa immagazzinato in precedenza si sprigiona provocando una spinta che permette di superare quelle zone di scarsità di risorse nella speranza di trovare ambienti meno ostili; e quella passiva, che invece entra in gioco nella fase di crescita diffusa permettendo un branching uniforme e fitto (ma di raggio limitato) al fine di massimizzare le ife e quindi la superficie utile per l'assorbimento di nuovo nutrimento.

Una esplorazione diffusa non sarebbe sufficiente per far crescere l'organismo oltre i margini della colonia; ma è solo grazie ad una traslocazione "a lunga distanza" che si riescono a concentrare le risorse per bypassare quelle zone con poche o nessuna risorsa.

Questo movimento interno di fluidi avviene grazie alle possibilità del fungo di controllare in maniera sofisticata l'apertura e la chiusura dei pori nei setti.



**f16**  
Due colonie diverse (della stessa specie) diventano un organismo unico quando fanno anastomosi







Il flusso di massa però non segue gli stessi paradigmi di sistemi analoghi in piante e animali. Le piante sono sistemi aperti che guidano il trasporto dell'acqua e dei sali minerali dalle radici a tutte le parti della pianta tramite la traspirazione delle foglie e attraverso un gradiente osmotico. Gli animali usano il cuore o organi contrattili per far circolare il sangue attraverso un sistema tipo-frattale e gerarchizzato di vasi. I miceli invece hanno la tendenza ad essere isolati dall'ambiente esterno tramite un rivestimento idrofobo, mentre il movimento di massa entra in gioco solo quando vi è un aumento o una diminuzione di pressione interna, causata da una fuoriuscita di acqua dalla rete per via di una perdita localizzata, o tramite evaporazione o per via della crescita stessa. E' dunque un sistema idraulico integrato che aumenta di volume come risultato di un equivalente assorbimento di acqua o una riduzione di volume in un'altra parte del micelio.

Questa riduzione di volume può essere anch'essa una strategia. Mentre una colonia giovane crea una rete ifale molto interconnessa, diffusa e densa; una maggiore espansione può essere spinta da un riciclo parziale di materiale ridondante fino addirittura ad arrivare ad una rete ifale minima quando le risorse si sono completamente esaurite<sup>11</sup>. Come alcune regioni si espandono e maturano, così altre regrediscono e il processo di autofagia diviene essenziale per permettere al fungo di trarre energie da quelle parti non più necessarie, o che presentano disfunzioni, e supportare così una nuova crescita in futuro.

Nonostante a priori non sembri esserci legame, nei funghi la possibilità di ottenere reti di trasporto efficienti, ma allo stesso tempo bassissimi costi di costruzione della rete ifale stessa, si attua alle spese di altre proprietà, come la resistenza al danneggiamento. Considerare la robustezza al danno in termini di resistenza meccanica a lacerazioni e abrasioni ha maggior significato nei miceli dei funghi che vivono a lungo e che dunque nel tempo si sono sempre più specializzati. In colonie più giovani l'avere un largo numero di alternative di percorsi è essenziale non solo come strategia per un trasporto efficiente bensì anche come risposta dinamica ad un possibile danneggiamento. Mentre il flusso di trasporto cambia percorso, l'organismo mette in pratica dei comportamenti localizzati irrobustendo la struttura dei collegamenti adiacenti a quelli lacerati in modo da poter ricrescere e successivamente riconnettersi.

Durante l'esplorazione del substrato, la morfologia del micelio non è condizionata soltanto dalla presenza o meno di sostanze nutritive ma è anche influenzato da campi elettrici, gravitazionali o autoindotti<sup>12</sup>. Non solo dunque fenomeni di galvanotropismo, fototropismo e gravitropismo - quest'ultimi chiaramente osservabili durante la formazione del corpo fruttifero - ma si suppone anche di auto-tropismo<sup>13</sup>. L'aggregazione unidirezionale delle ife che da origine a cordoni ifali o rizomorfe non avviene tramite il rilascio di ormoni come invece in altri sistemi animali o vegetali (nei funghi non sono mai stati trovati); piuttosto può essere spiegato come la creazione di un campo magnetico auto indotto da una singola ifa, seguito e ampliato dalle altre ife che si trovano all'interno di una specifica soglia. Questa interpretazione del comportamento aggregativo ed esplorativo del micelio, sostenuta anche da Meskauskas, ha dato origine a nuovi modelli di studio morfogenetico basati appunto sulle intelligenze collettive (swarm intelligence) già trattati in precedenza.

/11 Heaton, Luke; et al.: "Analysis of fungal networks", 2012

/12 Meskauskas, Audrius; et al. - "Simulating colonial growth of fungi with the Neighbour-Sensing model of hyphal growth", 2004

/13 Con il termine *auto-tropismo* si intende la capacità delle ife di potersi orientare a seconda della direzione delle proprie vicine. Un tropismo che viene influenzato non da agenti esogeni ma endogeni al sistema: il micelio stesso.

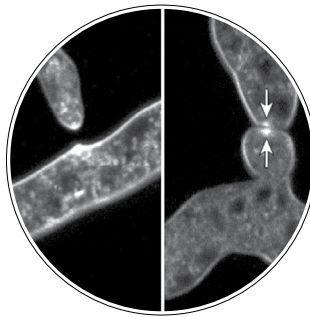




## branching

---

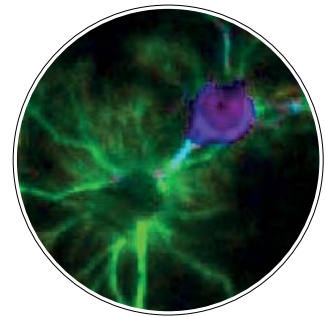
Le due principali caratteristiche di crescita sono la ramificazione e la riconnessione delle ife. La prima, chiamato *branching*, può avvenire o per biforcazione degli apici, oppure lateralmente ad una ifa già formata e sviluppata.



## anostomosis

---

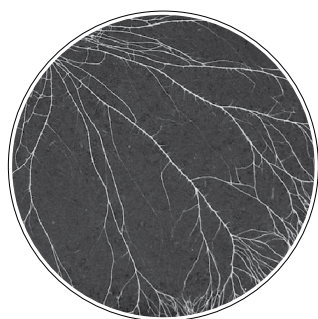
Si tratta della fusione di due ife; avviene durante una fase cruciale dello sviluppo del micelio. E' ormai associata la sua importanza al fine di creare loops all'interno del micelio e permettere la comunicazione tra diverse ife, nonché la traslocazione di acqua e nutrienti. L'anastomosi è implicata nella formazione di aggregati di ife da cui il corpo fruttifero deriva. Avviene non solo all'interno della colonia ma anche tra diverse colonie. Similarità con le venature delle foglie.



## translocation

---

La traslocazione è la capacità di redistribuire i nutrienti dalla periferia al centro e viceversa attraverso il network creato dal micelio. Mentre in una colonia giovane il flusso di massa va da la parte inoculata verso la periferia per incentivare la crescita e la ricerca di terreno ricco di nutrienti; in una colonia già formata inizia a svilupparsi una redistribuzione dei nutrienti. Avviene dunque una transizione che permette alla traslocazione di essere bidirezionale a differenza di altri sistemi vascolari animali e vegetali.



## **autophagy**

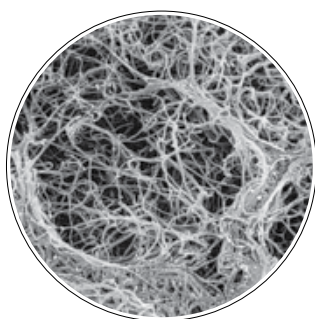
---

L'autofagia è quel processo mediante il quale il micelio trae nutrimento digerendo alcune parti di se stesso.

Mentre una colonia giovane crea una rete molto interconnessa, diffusa e densa; una maggiore espansione può essere spinta da un riciclo parziale di materia ridondante fino addirittura ad arrivare ad uno scheletro minimo quando le risorse si sono esaurite.

---

•



## **robustness**

---

La possibilità di avere reti di trasporto efficienti e allo stesso tempo bassissimi costi di costruzione della rete stessa si attuano a spese di altre proprietà, come la resistenza al danneggiamento.

Per robustezza, nelle colonie più giovani, si intende come la possibilità di avere un largo numero di alternative di percorsi possibili nella rete. Questo è essenziale per una risposta locale al danneggiamento: viene irrobustita la struttura dei collegamenti adiacenti al fine di permettere la ricrescita e riconnessione.

---

•



## **\_tropism**

---

Il micelio mette in mostra fenomeni di gravitropsismo (orientamento in funzione della gravità) fototropismo (il corpo fruttifero per esempio cerca di seguire la luce) ma anche auto-tropismo: le ife si orientano a seconda della direzione delle ife vicine.

---

•

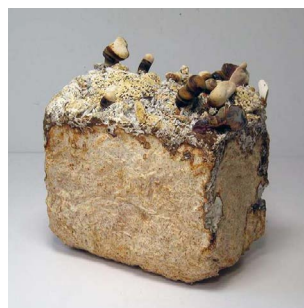




I funghi sono un componente essenziale per la maggior parte degli ecosistemi e sono responsabili della decomposizione di materiale organico nonché della ridistribuzione di nutrienti attraverso l'ambiente, supportando così la vita animale e vegetale. La presenza di colonie di funghi e delle loro attività simbiotiche permette di risanare quegli habitat carenti di sostanze nutritive, ricchi di inquinanti o di rifiuti tossici. Il micelio resta in costante comunicazione con il proprio ambiente e non soltanto sopravvive, ma a volte si espande per migliaia di ettari raggiungendo addirittura una massa pari a quella di un qualsiasi altro organismo sul pianeta<sup>14</sup>. Questa capacità di spalmare una enorme quantità di cellule sopra superfici così estese testimonia strategie evolutive versatili e di successo implicando un elevatissimo trasferimento di informazioni e sostanze.

La possibilità di poter sfruttare queste capacità a dato luogo ad una diversità di studi e progetti, che riguardano non solo la scienza bensì anche la tecnologia, l'architettura e il design.

Paul Stamets si occupa da anni di sperimentare la possibilità di utilizzo dei miceli come mezzo per risanare gli ecosistemi, partendo da piccole nicchie ecologiche fino a teorizzare un riequilibrio a livello globale. Definito *mycore-storation* l'uso dei funghi per riparare e ristabilire il sistema immunitario dell'ambiente, individua poi quattro applicazioni pratiche: *mycoremediation*, ovvero l'uso dei funghi per degradare o rimuovere tossine dall'ambiente, *mycoforestry* per sostenere lo sviluppo dei boschi e delle foreste, *mycofiltration* per filtrare microorganismi e inquinamento in acqua e *mycopesticides*, l'uso dei funghi come pesticidi naturali. Come non ci sarà il biocarburante che salverà il pianeta dall'inquinamento o un'unica fonte 100% rinnovabile di produzione di energia, così non credo che il solo sfruttamento delle proprietà dei funghi possa essere sufficiente a far diventare il nostro pianeta un unico grande ecosistema. Sarà solo attraverso l'integrazione di più sistemi - ognuno con le proprie caratteristiche e diversità locali - che sarà possibile iniziare a parlare di sostenibilità, ed è in questi termini che il lavoro di Stamets potrebbe diventare fondamentale e diventare un esempio verso una maggiore sensibilità ambientale.



\_f18  
**MYCOTECTURE** brick  
<http://philross.org/>

/14 Stamets, Paul - "Myceliym Running: How Mushrooms Can Help Save the World" - Ten Speed Pr, 2005



\_f19

**MYCOTECTURE** parte interna  
<http://philross.org/>

A livello progettuale i lavori fatti non si basano su paradigmi tanto diversi. La chiave qui sta nella possibilità di creare un materiale (o ben più di uno) attraverso processi a bassissimo impatto ambientale, utilizzando materie prime di scarto e il micelio come aggregante.

Il micelio viene fatto crescere in un substrato umido composto da polvere di legno, paglia o comunque materiale organico contenente lignina e cellulosa, in ambiente sterile, finché questo non abbia riempito tutto lo spazio possibile all'interno del contenitore in cui viene fatto crescere. A quel punto il composto viene fatto essiccare a temperature relativamente basse (50/70°C) in modo da far evaporare tutta l'umidità. Il micelio, crescendo e riconnettendosi tramite anastomosi, funziona da aggregante e il substrato originario, in parte digerito, acquista caratteristiche meccaniche prima inesistenti, diventando un composto solido e resistente.

La specie di fungo utilizzata, così come la varietà delle materie prime su cui farlo crescere, danno origine ad un ventaglio di possibilità e materiali molto diversi. Quello che accomuna i vari risultati è il carattere sostenibile presente e il bassissimo impatto ambientale. Il substrato può essere composto da materiali di scarto di altri processi produttivi (pula di riso, segatura, scarti di lavorazioni della carta), e la crescita del micelio avviene senza apparente dispendio di energia. La biodegradabilità del composto finale poi permette uno smaltimento sicuro senza rilascio di sostanze tossiche nell'ambiente.

***“Foresters are realizing that a rotting tree in the midst of a canopied forest is, in fact, more supportive of biodiversity than a living tree.”***

***Paul Stamets***



\_f20

**MYCOTECTURE** by Philip Ross, 2009  
<http://philross.org/>

**MYCOTECTURE** è un progetto del 2009 di Philip Ross. Ross è un artista che da anni si è specializzato nella ricerca sul micelio al fine di poter realizzare un materiale da costruzione. Mycotecture è una installazione temporanea, una casa del tè composta da mattoni fatti di segatura e micelio; un primo e acerbo approccio alla tematica che ha però aperto la strada a tantissimi altri lavori, tutti postumi e tutti ispirati alla ricerca di Ross. I suoi lavori sono stati presentati al Museo di Arte Moderna di New York, al County Museum of Art di Los Angeles, la Biennale di Mosca, e la tedesca di Kunsthalle Düsseldorf. Nel 2013, i suoi mobili a base di micelio hanno vinto il Ars Electronica's Award of Distinction for Hybrid Art.



\_f21

**YAMANAKA MCQUEEN** - Walnut & reishi mushrooms,  
 by Philip Ross, 2013  
<http://philross.org/>



**\_f22**  
**MYX** by Jonas Edvard, 2013  
<http://jonasedvard.dk/work/myx/>



\_f23

**MYCELIUMCHAIR** by Eric Klarenbeek, 2013  
<http://www.ericklarenbeek.com/>

**MYX** è la lampada di Jonas Edward.

L'idea è quella di comprare un duplice prodotto: prima semplicemente un substrato già inoculato di micelio che permetta di produrre funghi da cucinare e mangiare, ciò che rimane viene poi essiccato (per fermare la crescita del micelio) e riutilizzato come paralume per una lampada.

**MYCELIUMCHAIR** si tratta invece di un primo risultato ottenuto da Eric Klarenbeek, nel tentativo di unire la tecnologia della stampa 3D con le possibilità del micelio. L'obiettivo è quello di riuscire a stampare direttamente un substrato con la tecnologia FDM (fluid deposit materials) già inoculato senza la necessità di avere un involucro/cassero esterno.





\_f24



**HY-FI** - The Living  
 photos by Andrew Nunes  
<http://www.thelivingnewyork.com/>

**\_f25**

**HY-FI** è una installazione firmata David Benjamin, che ha vinto il Moma PS1 di New York nel 2014. In collaborazione con ARUP il progetto è stato ingegnerizzato e costruito. La forma della torre è stata ottenuta mediante processi indipendenti dal materiale usato e il progetto, se non fosse per la scala, non è nulla di tanto diverso dal lavoro di Ross del 2009. Lo studio dei mattoni è stato fatto in collaborazione con l'azienda americana Ecovative Design; come si vede dalla figura **\_f26**, la sezione mostra un composto eterogeneo e poco compatto a differenza delle superfici esterne (**\_f24**).

**\_f26**





**\_f27**

**MYCELIUM MATERIAL**, sample  
by Officina Corpuscoli  
<http://www.corpuscoli.com>



**\_f28**

**THE FUTURE OF PLASTIC**  
by Officina Corpuscoli  
<http://www.corpuscoli.com>



**\_f29**

**MUSHROOM® PACKAGING** by Ecovative Design  
<http://www.ecovatedesign.com/>



**\_f30**

**MYCO BOARD** by Ecovative Design  
<http://www.ecovatedesign.com/>

**\_f27 / \_f28. OFFICINA CORPUSCOLI**

È un progetto di Maurizio Montalti. Il suo lavoro si è concentrato nella ricerca nuovi materiali e prodotti che possano sostituire, in un futuro, la plastica. Sfruttando infatti alcune proprietà - tra cui quella idrofoba del micelio - ha letteralmente fatto "crescere" oggetti di design in una nuova visione di quello che potrà essere considerata plastica. Inoltre, in collaborazione con il Mediamatic di Amsterdam e l'università di Utrecht, Maurizio ha dato inizio ad una serie di progetti collaterali tutt'ora in corso.

**\_f29 / \_f39. ECOVATIVE DESIGN**

Eden Bayer e hanno dato vita a questa azienda che sta cercando di commercializzare diversi prodotti di micelio in numerosi campi: dal packaging, alle tavole da surf, a materiali isolanti e da costruzione.

INSERTO A

## arte in-vitro

In vitro significa "sotto vetro" e si riferisce all'esecuzione di esperimenti in provetta o in un qualsiasi altro ambiente controllato. Le ricerche in vitro hanno lo scopo di descrivere gli effetti di singole variabili sperimentali che influiscono su di un organismo o su parti di esso come organi, tessuti, cellule etc. Grazie alla sterilizzazione - il processo mediante il quale i microorganismi vengono uccisi dall'aumento di temperatura e pressione - lo spazio racchiuso dal contenitore di vetro diventa un ambiente controllato che fornisce il substrato ideale per poter far sviluppare una specifica popolazione di cellule viventi.

Il Time del giugno 1978 dedica la copertina all'imminente nascita dei primi test sulla fecondazione in provetta. E' l'inizio della sensibilizzazione dell'opinione pubblica sulla possibilità della scienza di poter riprodurre la vita all'interno di sintetici contenitori di vetro. La copertina, con palesi riferimenti all'affresco di Michelangelo, non vuole sollevare solo questioni etiche su come possa essersi lesa una delle più intime condizioni umane; bensì suggerisce l'idea che le funzioni del corpo umano possano essere tecnicamente descritte come ogni altro qualsiasi sistema, diventando dunque suddivisibili in sottoparti misurabili e quantificabili.

La necessità di proteggere e rendere confortevole ciò che consideriamo vitale ha spinto alla creazione di numerosi spazi chiusi tra cui le recinzioni dei giardini, i vasi in ceramica per le nostre piante, fino ad arrivare ai bio-reattori trasparenti per la crescita di tessuti. Questi ambienti protetti pongono l'attenzione sui nostri bisogni come esseri umani e si manifestano come veicolo nel tentativo di addomesticarli<sup>1</sup>.

Anche l'arte in questo ha trovato terreno fertile per diverse forme espressive. Il concetto di ambiente protetto è un tema centrale delle pratiche espositive, meno forse lo era invece la vita. Nasce dunque la "bioart" intesa come quella pratica artistica dove si lavora con tessuti, batteri, organismi viventi o processi della vita. Ma come suggerisce Pamela M. Lee<sup>2</sup>, ormai questo termine come altri vengono spesi con troppa facilità e con altrettanta facilità sono fra-intesi. Il valore del termine acquista un significato diverso se tutto il lavoro artistico viene anch'esso considerato come un organismo di cui la forma artistica è autorizzata dal concetto di vita. Questo implica il doversi relazionare con qualcosa di dinamico e mutevole, la forma di vita include e viene se stessa inclusa nel lavoro artistico. Una narrativa che inquadra il lavoro artistico come un sistema che non si focalizza principalmente sul mezzo bensì su come la struttura dell'opera inneschi complesse interazioni con l'ambiente, giungendo ai pensieri di Georges Canguilhem<sup>3</sup>: l'arte come strutturazione di materia e regolazione di funzioni.

Poco lontano da questi concetti si colloca il lavoro della ricercatrice e designer Shamees Aden che ha creato un nuovo paradigma per le scarpe da corsa dando origine ad una forte simbiosi tra tecnologia, biologia ed arte. Le scarpe sono stampate in 3D e composte da un materiale biologico sintetico a base di proto-cellule, capaci di reagire alla pressione e ai movimenti differenti del piede. Questa capacità di adattamento permette alla scarpa di gonfiarsi



\_f31

**COPERTINA DEL TIME**

31 luglio 1978

<http://content.time.com/time/covers>

/1 Ross, Philip - "BioTechnique" - Yerba Buena Center of the Arts, 2007

/2 Pamela M. Lee - "The work of art as life"

/3 Georges Canguilhem (1904-1995) è stato un filosofo ed epistemologo francese.

ed irrigidirsi in funzione del tipo di suolo, del tipo di piede, del tipo di camminata o corsa.

Le proto-cellule sono molecole molto semplici, non vive, che possono essere combinate per creare organismi viventi. Miscelando diversi tipi di queste molecole, infatti, si sta tentando di produrre sistemi artificiali che possano essere programmati in base a differenti comportamenti, come la risposta alla pressione, alla luce o al calore. Dopo una sessione di *jogging* però le strutture organiche perdono le loro capacità adattive e hanno bisogno di rigenerarsi. Ecco l'importanza del contenitore, un cilindro di vetro pieno di proto-cellule liquide, in cui riporre le scarpe dopo l'uso. Un processo *in vitro* necessario per il manifestarsi di una specifica funzione data dal prodotto dell'auto-organizzazione di forme primordiali di vita.

***“By providing environments to live within, we can appreciate the details of a framed existence. Our attention is drawn not only to isolated living element, but also to the greater organization from which it has been removed. The small parts, once enclosed and removed from their native residence, are where we truly focus our gaze, their isolation serving as a lens through which to imagine an entire living world.”***

***Philip Ross***



# RICERCA

---

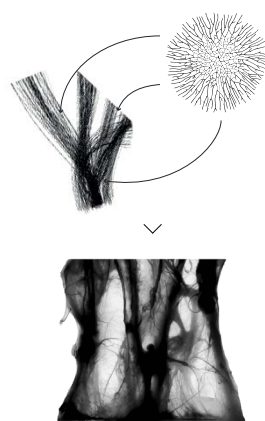
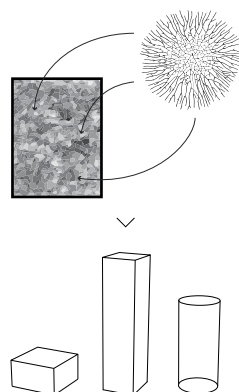
### DIFFERENZE DI APPROCCIO

Contrariamente ai progetti fin'ora presentati come esempio, le intenzioni di questo lavoro sono quelle di esplorare le capacità tettoniche del micelio. Piuttosto che andare alla ricerca di un materiale "omogeneo", che permetta espressioni formali precostituite, si è cercato di sfruttare a fondo le proprietà di differenziazione e adattamento che caratterizzano la crescita dell'organismo. Se la tettonica relaziona i processi di costruzione della materia con la morfologia prodotta, allora diventa interessante poter veicolare il micelio permettendogli di "processare" uno spazio (substrato) precedentemente elaborato.

A partire dalla *capsula Petri* si sono quindi intraprese diverse vie di indagine che permettessero di capire in che modo la crescita potesse essere allo stesso tempo controllata e risultare eterogenea.

Le esplorazioni materiali che ci permettono di indagare, passo dopo passo, le innumerevoli capacità del sistema scelto, inducono una serie di problematiche in più rispetto alle indagini che invece prediligono un approccio digitale; ancor di più quando si tenta di negoziare tra territori propri dell'architettura, della biologia e della tecnologia. Lavorare con organismi viventi, per quanto apparentemente molto semplici, implica tutta una serie di considerazioni teoriche ed operative di non poco conto. Conoscere le strategie di crescita e di esplorazione dello spazio di una specie di miceli, ad esempio, non significa necessariamente averle comprese e fatte proprie. Anche in un sistema in cui le variabili in gioco si possono apparentemente contare sulle dita di una mano, i fattori che invece possono influire sulla crescita dell'organismo sono esponenzialmente di più. Questo implica che il cercare di codificare un dato comportamento, per poi successivamente calibrarlo, diventa una operazione complessa da affrontare con rigore scientifico, avanzando per tentativi e fallimenti.

Tantissime realtà, qui affrontate o scoperte, avrebbero meritato un approfondimento ulteriore tanto da poter diventare esse stesse oggetto di altrettante tesi di laurea. Le difficoltà nello scindere cosa indagare o meno, all'interno di un percorso in cui il *range* di direzioni possibili è in continuo mutamento, è stata senz'altro una delle massime sfide di questo percorso.



**f33** Facendo crescere il micelio all'interno di substrati omogenei (alla macro-scala) sarà il contenitore nel quale è contenuto a dare la forma finale alla materia. *mycelium tectonics* vuole invece esplorare le capacità di differenziazione del micelio.

## MATERIALI E METODI

A livello operativo queste considerazioni si traducono in prima analisi nel conoscere le basi della biologia e gli strumenti di laboratorio. La tipologia di esplorazioni qui indagate hanno reso necessaria una certa dimestichezza con i composti chimici per la preparazione dei substrati, nonché una discreta conoscenza delle colture *in vitro*.

Il concetto base che accomuna tutte le varie prove di laboratorio è quello di sterilità: elemento indispensabile e caratteristica imprescindibile al lavoro di indagine sugli organismi viventi. Sterilizzare significa rendere un materiale o una sostanza priva di organismi viventi<sup>1</sup>, diventando così idoneo alla crescita di una specifica e voluta popolazione. Lavorare in assenza di sterilità permette ad altri microorganismi (solitamente, in questo caso, funghi sporigeni) di colonizzare il substrato preparato diventando così dei *competitors* che sottraggono risorse nutritive all'oggetto di studio. Questo induce meccanismi di sopravvivenza e colonizzazione dipendenti dalla natura dell'agente inquinante aumentando le variabili in gioco e di conseguenza modificandone il comportamento e le possibilità di analisi. La sterilità - per quanto rimanga comunque un concetto probabilistico e aleatorio - viene assicurata tramite l'autoclave, uno strumento costituito da una camera stagna in cui una resistenza scalda un certo quantitativo d'acqua per un dato tempo (solitamente 121°C per 20'). L'acqua, aumentando di temperatura, cambia di fase diventando vapore ed inducendo un aumento di pressione.

A questa operazione segue l'inserimento dell'organismo vivente all'interno del materiale sterilizzato, ovvero inoculare il substrato. Una porzione di organismo viene prelevata da un contenitore - anch'esso un tempo sterile e poi colonizzato - e inserita nel nuovo substrato precedentemente preparato. Tutto ciò deve avvenire in ambiente sterile. Perciò si è lavorato sotto una cappa a flusso laminare in cui il flusso di aria sterile e mono-direzionale impedisce a spore o batteri aerei di depositarsi sul substrato o sugli strumenti che si stanno utilizzando. Tutte queste operazioni necessitano di una certa sensibilità e dimestichezza ma nonostante ciò le probabilità di inquinamento rimangono comunque elevate.

La complessità dei modelli raggiunta nelle ultime fasi di ricerca ha reso indispensabile una grande cura e attenzione ad ogni singola operazione al fine di tenere il più possibile bassa la probabilità di inquinamento. L'alto numero di strumenti, baker, spatole, pinze o cilindri graduati, che dovevano essere utilizzati per dare origine alla colonizzazione delle strutture in canapa e (bio) plastica, venivano solitamente utilizzati all'interno della stessa sessione di lavoro, tutti sotto cappa con grossi rischi di inquinamento nei numerosi passaggi tra una operazione con uno strumento e un'altra.

Così anche le dimensioni dei modelli hanno comportato la necessità di soluzioni innovative. Abbandonato il campo delle *capsule Petri* ci si è addentrati in territori inesplorati, dove nuove problematiche sono sorte. L'aumento di volume dei contenitori, ad esempio, ha modificato le caratteristiche dell'ambiente

**/1** La sterilità è un concetto probabilistico. Un materiale viene definito sterile se il SAL (livello di sicurezza di sterilità) è inferiore a  $10^{-6}$ ; cioè quando le probabilità di trovarvi un microorganismo sono inferiori ad una su un milione.

abbassando notevolmente il grado igrometrico dell'aria. Per assicurare la giusta umidità si sono pertanto costruite camere umide, in diverse tipologie, prima di capire quale fosse la soluzione ottimale.

Queste considerazioni tentano di evidenziare alcune delle difficoltà operative che si celano dietro all'esperienza in laboratorio ponendo le basi per la comprensione di tutte le fasi del percorso di ricerca.

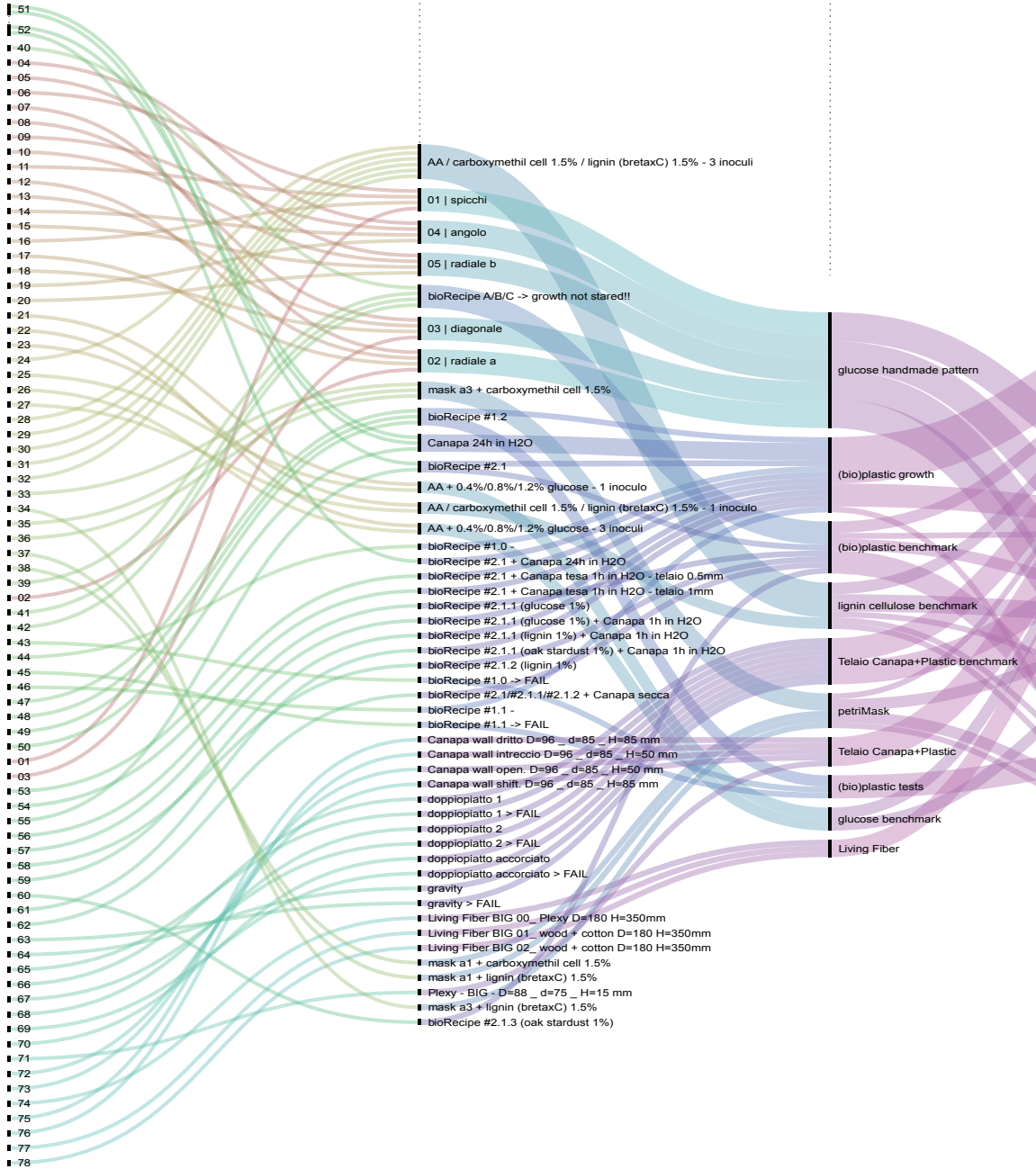
**f34** Lo schema compara le dimensioni dei vari contenitori usati per far crescere il micelio. Partendo da esperimenti nelle *capsule Petri*, che è una condizione diciamo bi-dimensionale o 2.5D, si è passati poi a contenitori in vetro di altezza dai 70 ai 150 mm. Nei modelli più grandi, per sfruttare le dimensioni massime dell'autoclave, si sono utilizzati dei sacchi appositi per formare una camera umida che contenesse le strutture da far colonizzare.



## CAMPIONE

## NOME E SUBSTRATO

## CATEGORIA

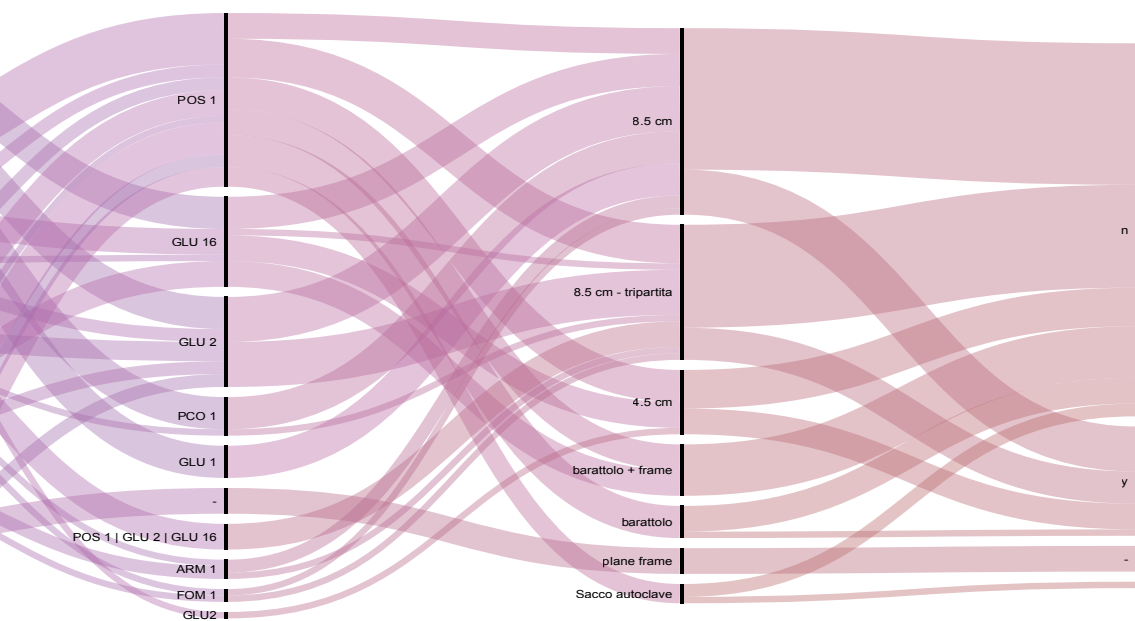




MICELIO

TIPO DI SUPPORTO

INQUINATO?



**f35** Diagramma dei 78 campioni sperimentali raggruppati in funzione del tipo di prova, di substrato, di contenitore e di specie/ceppo di micelio.

## 3.1.0

# inVitro mycoTests 00

Grazie alla disponibilità offerta dal Centro di Micologia Applicata della facoltà di Agraria dell'Università di Bologna, si sono eseguiti alcuni test con lo scopo di iniziare ad indagare la possibilità di guidare e indirizzare la crescita del micelio.

### GLUCOSE HANDMADE PATTERN

Un primo set di capsule Petri (85mm di diametro) è stato preparato lavorando su A-A (*agar agar grade a*) a diverse concentrazioni di zucchero (glucosio).

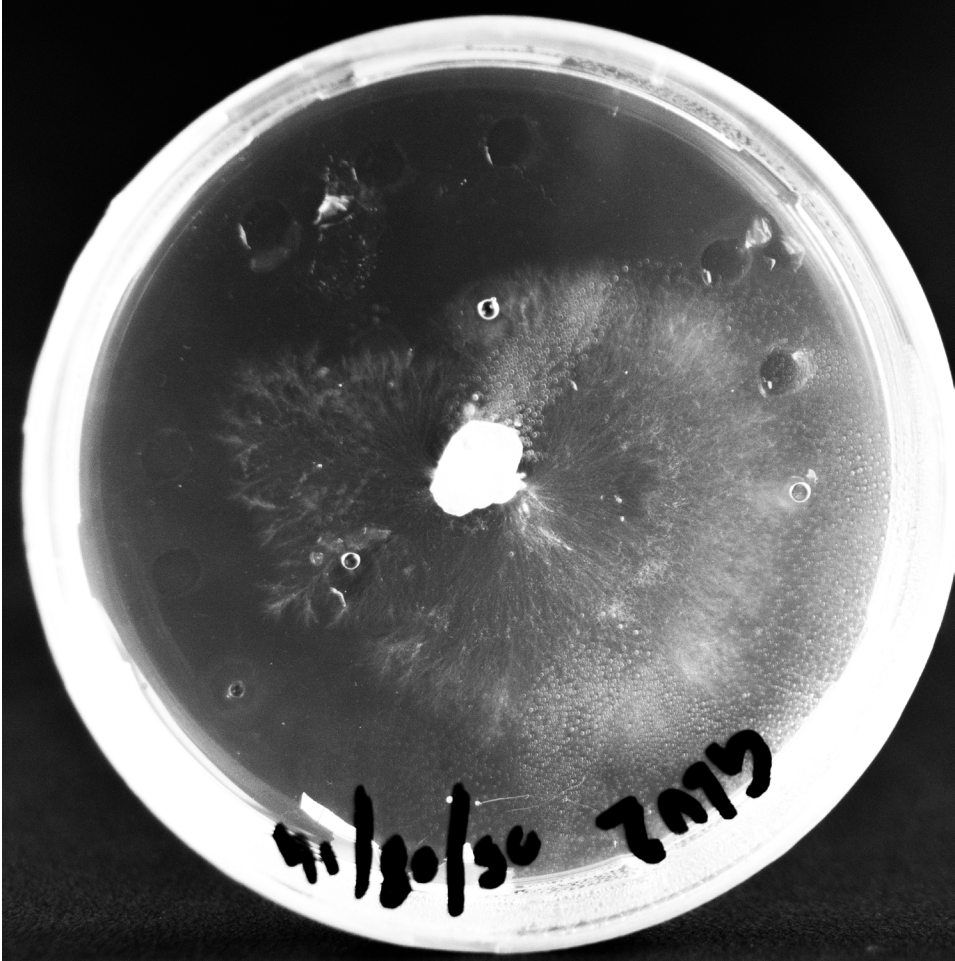
Partendo da una base di A-A senza zucchero si sono poi inseriti puntualmente dei pozzetti a diverse concentrazioni di glucosio.

L'obiettivo è stato quello di capire ed analizzare le diverse morfologie di crescita del micelio in funzione della quantità di nutrimento e della sua distribuzione nella piastra.

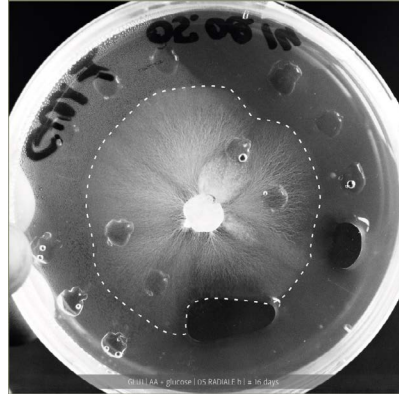
In questo primo lavoro si sono selezionati quattro diverse specie di miceli:

- *Ganoderma lucidum* (GLU1 \_ ceppo 1)
- *Ganoderma lucidum* (GLU2 \_ ceppo 2)
- *Ganoderma lucidum* (GLU16 \_ ceppo 16)
- *Pleurotus cornucopiae* (PCO1 \_ ceppo 1)

Dopo sedici giorni di crescita, purtroppo, molte piastre sono risultate inquinate da colonie batteriche o altri organismi. Anche i risultati ottenuti non sono molto soddisfacenti; colpa forse dei pozzetti troppo puntuali e di dimensioni troppo ridotte. Il GLU2 si è mostrato il più veloce a crescere. La disomogeneità di crescita, fattore comune a tutte le piastre, è comunque un risultato positivo.



**\_f36** Campione 0.0.6, il micelio GLU2 è cresciuto eterogeneamente prediligendo una porzione di piastra



SAMPLE #0.0.5 - GLU 1



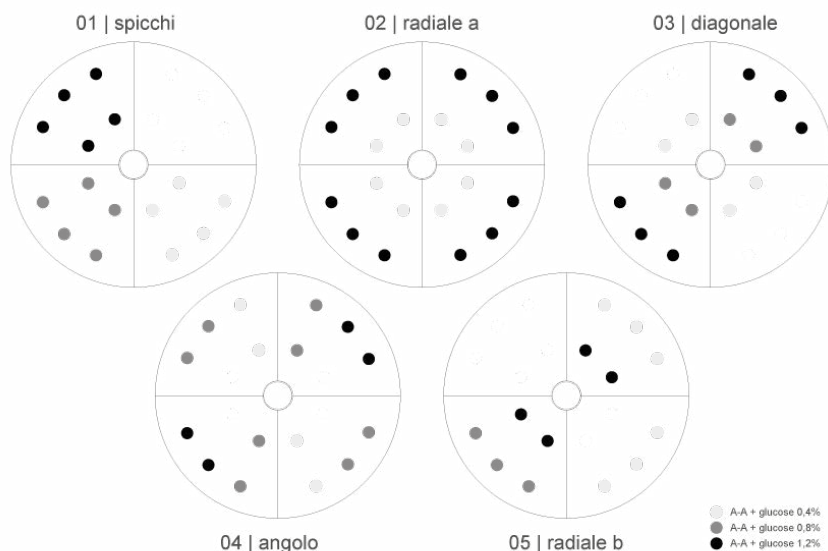
SAMPLE #0.0.10 - GLU 2



SAMPLE #0.0.16 - PCO 1

SAMPLES\_#0.0.\*  
VA  
INOCULO di tipo "A"  
CAPSULA petri 85mm

CRESCITA  16 |  
giorni



## GLUCOSE AND PLEUROTUS

Si è capito che le zone con le diverse concentrazioni di zucchero dovevano essere più ampie e meno puntuali. Così si sono eseguiti dei test più semplici utilizzando delle capsule Petri tripartite. In ognuno dei settori si è inserito un substrato preparato a base di A-A (*agar agar grade a*) e una specifica concentrazione di zucchero glucosio. In particolare:

- 1° settore: A-A (AA) al 1.5%
- 2° settore: A-A + glucosio 0.8% (AA08)
- 3° settore: A-A + glucosio 1.2% (AA12)

Il micelio scelto per questa prova è il *Pleurotus Ostreatus*, un micelio molto comune e resistente che presenta una alta velocità di crescita e pertanto adatto agli scopi della tesi.

Viene definito inoculo quella porzione di sostanza, infettata dal microorganismo, che viene utilizzata per colonizzare il substrato.

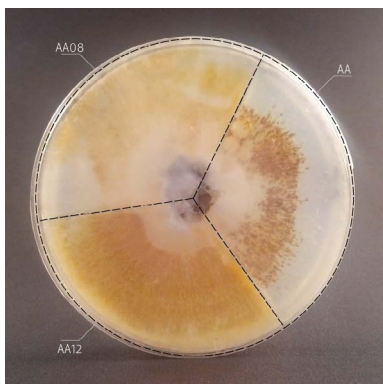
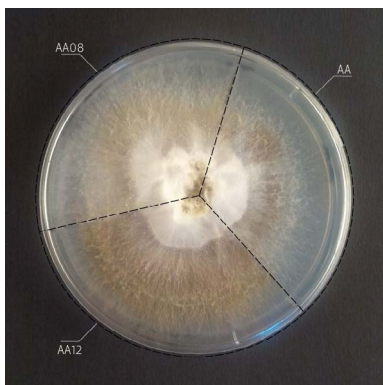
In questi test si sono sperimentate due diverse tipologie di inoculo: uno unico, centrale, per tutta la piastra, ed un altro invece suddiviso in tre porzioni, uno per ogni settore.

Si è notato che le piastre con un unico inoculo centrale presentavano una crescita più uniforme ai margini della colonia; questo dovuto probabilmente al fatto che già di partenza il micelio si presenta come un organismo unico e dai primi momenti di crescita il nutrimento viene traslocato al suo interno tra le porzioni di micelio appartenenti a settori diversi della piastra. Si è preferito dunque l'inoculo di tipo B in cui per ogni settore il micelio presenta una crescita autonoma, almeno nelle prime fasi; finché le colonie non si incontrano ai margini dei settori, fondendosi per via dell'anastomosi.



**SAMPLE #0.1.1**  
**PLEUROTUS OSTREATUS**  
**INOCULO** di tipo "A"  
**CAPSULA** petri 85mm

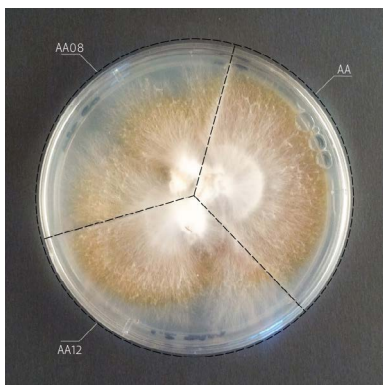
**CRESCITA** 6 | 9 | 15  
 giorni



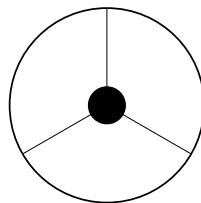


**SAMPLE #0.1.2**  
**PLEUROTUS OSTREATUS**  
**INOCULO** di tipo "B"  
**CAPSULA** petri 85mm

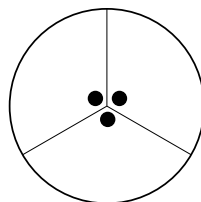
**CRESCITA** — 6 | — 9 | — 15 |  
 giorni



INOCULO di tipo A



INOCULO di tipo b



### 3.1.1

## inVitro mycoTest 01

Un terzo set di esperimenti è stato avviato per capire quali substrati fossero più idonei alla crescita tenendo conto delle seguenti variabili: velocità di crescita, compattezza delle ife, morfologia della colonia.

### LIGNIN AND CELLULOSE SUBSTRATE

Vista che la diversa concentrazione di zuccheri non ha prodotto risultati molto soddisfacenti, si è proceduto qui sperimentando nutrienti quali la lignina e la cellulosa, catene polimeriche capaci di essere degradate dai miceli saprofiti. Le capsule Petri tripartite sono state riempite con i seguenti substrati:

- AA\_ agar agar grade A | pH: 6,04 (test)
- LIGN\_ Lignosulphonate bretax C 1,5% + AA 1% | pH: 6,12
- CELL\_ carboxymethyl cellulose sodium salt 1,5% + AA 1% | pH: 5,92

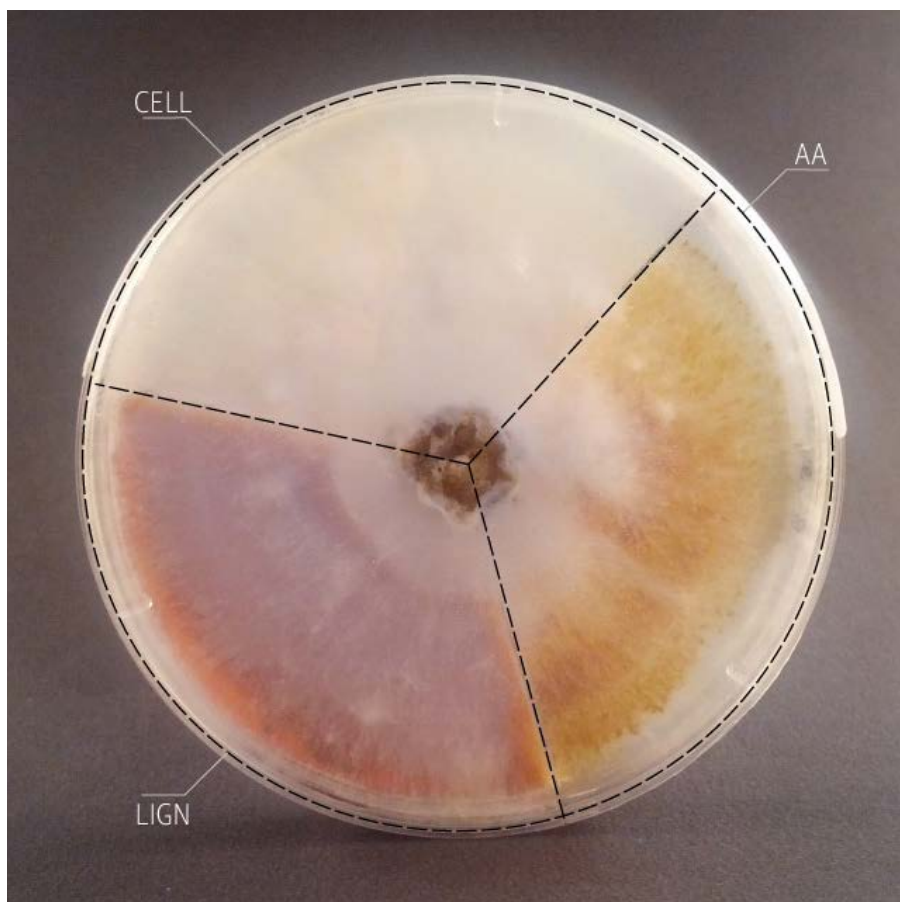
La tipologia di inoculo utilizzata è la B.  
Si è anche ampliato il pool di miceli:

- *Pleurotus ostreatus* (POS1 \_ ceppo 1)
- *Pleurotus cornucopiae* (PCO1 \_ ceppo 1)
- *Armillaria mellea* (ARM1 \_ ceppo 1)
- *Ganoderma lucidum* (GLU2 \_ ceppo 2)

Il POS1 e il GLU2 sono risultati sicuramente i miceli più veloci. L'ARM1 è caratterizzata dalla produzione dei rizomorfi nel substrato ligneo, mentre la crescita pare molto inibita sulla cellulosa. In generale, come ci si aspettava, il substrato ricco di lignina è quello che ha prodotto i risultati più soddisfacenti soprattutto in termini di compattezza della colonia. Interessanti fenomeni di pigmentazione sono apparsi nelle specie di *Pleurotus*.

In generale il *Pleurotus Ostreatus* si conferma il micelio con le caratteristiche più soddisfacenti.

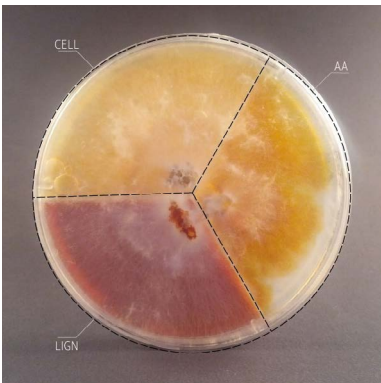




**\_f37** Campione #0.1.3, POS1 dopo 15 giorni di crescita. I substrati AA e LIGN mostrano pigmentazione

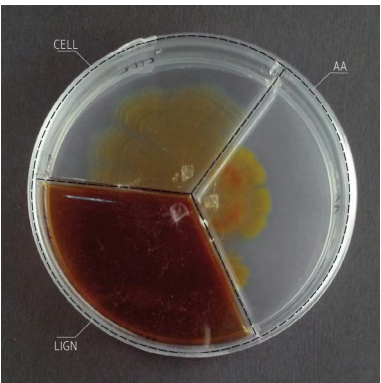
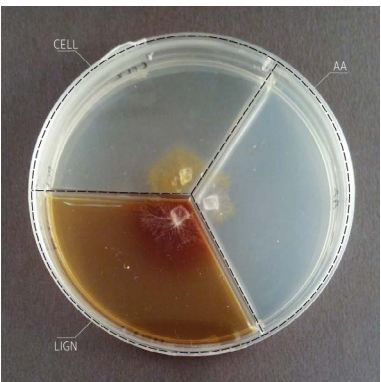
**SAMPLE #0.1.4**  
**PLEUROTUS OSTREATUS**  
**INOCULO** di tipo "B"  
**CAPSULA** petri 85mm

**CRESCITA** 6 | 9 | 15 |  
giorni



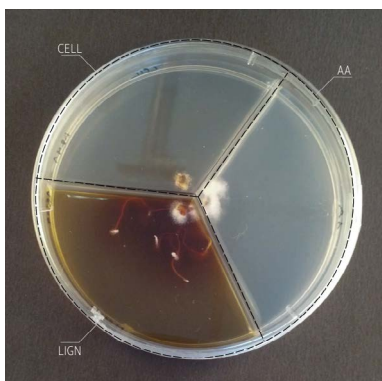
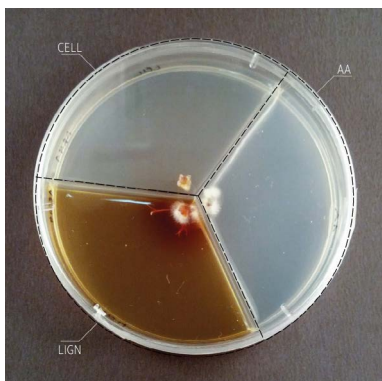
**SAMPLE #0.1.11**  
**PLEUROTUS CORNUCOPIAE**  
**INOCULO** di tipo "B"  
**CAPSULA** petri 85mm

**CRESCITA** 6 | 9 | 15 |  
giorni



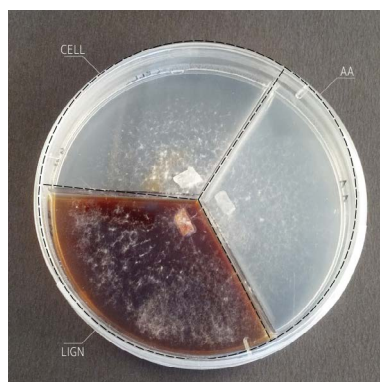
**SAMPLE #0.1.9**  
 ARMILLARIA MELLEA  
 INOCULO di tipo "B"  
 CAPSULA petri 85mm

**CRESCITA** — 6 | — 9 | — 15 |  
 giorni



**SAMPLE #0.1.8**  
 GANODERMA LUCIDUM  
 INOCULO di tipo "B"  
 CAPSULA petri 85mm

**CRESCITA** — 6 | — 9 | — 15 |  
 giorni



## 3.1.2

### inVitro petriMask

Uno step importante è stato quello di indagare le abilità connettive e di esplorazione di substrati solidi da parte dei miceli. L'intento è stato quello di superare i limiti dettati da un substrato liquido entrando nel campo di una condizione tridimensionale, per quanto ancora limitata allo spessore della capsula Petri (2,5D).

#### LA STAMPA 3D DELLE MASCHERE

Si è deciso di produrre alcune maschere da poter inserire all'interno delle capsule Petri da 85mm di diametro. Grazie all'ass. MakeInBo si sono stampate due tipologie di maschere, la tecnologia utilizzata è stata quella della stampa 3d FDM (filament deposit material).

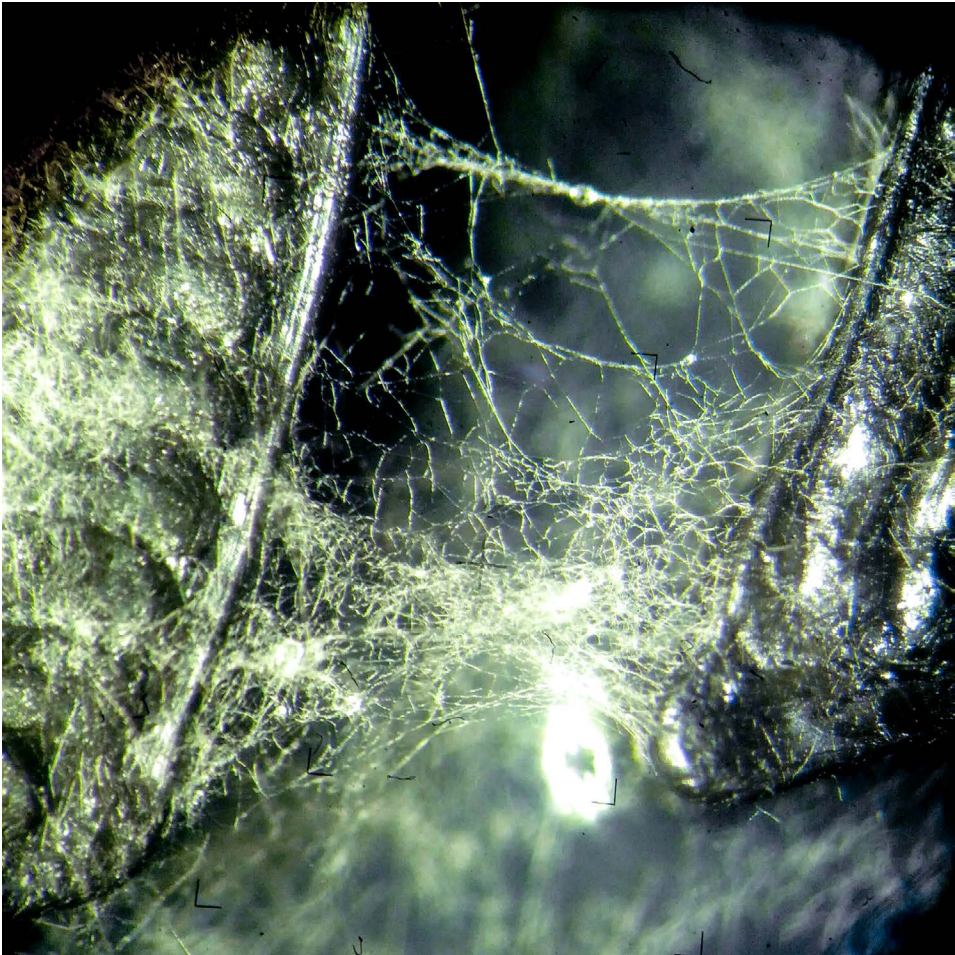
- Mask A1 (negative)
- Mask A3 (positive)

I materiali testati e disponibili sono stati il PLA (acido polilattico) e l'ABS (acrilonitrile butadiene stirene). Mentre il secondo ha reagito male alla sterilizzazione, in quanto il calore ha indotto importanti dilatazioni termiche compromettendone la morfologia, il PLA ha resistito seppure con qualche lieve deformazione. Quest'ultimo, essendo un polimero derivante dall'amido, è inoltre un materiale che può essere degradato dal micelio, con tempistiche però non coincidenti con quelle di questo lavoro.

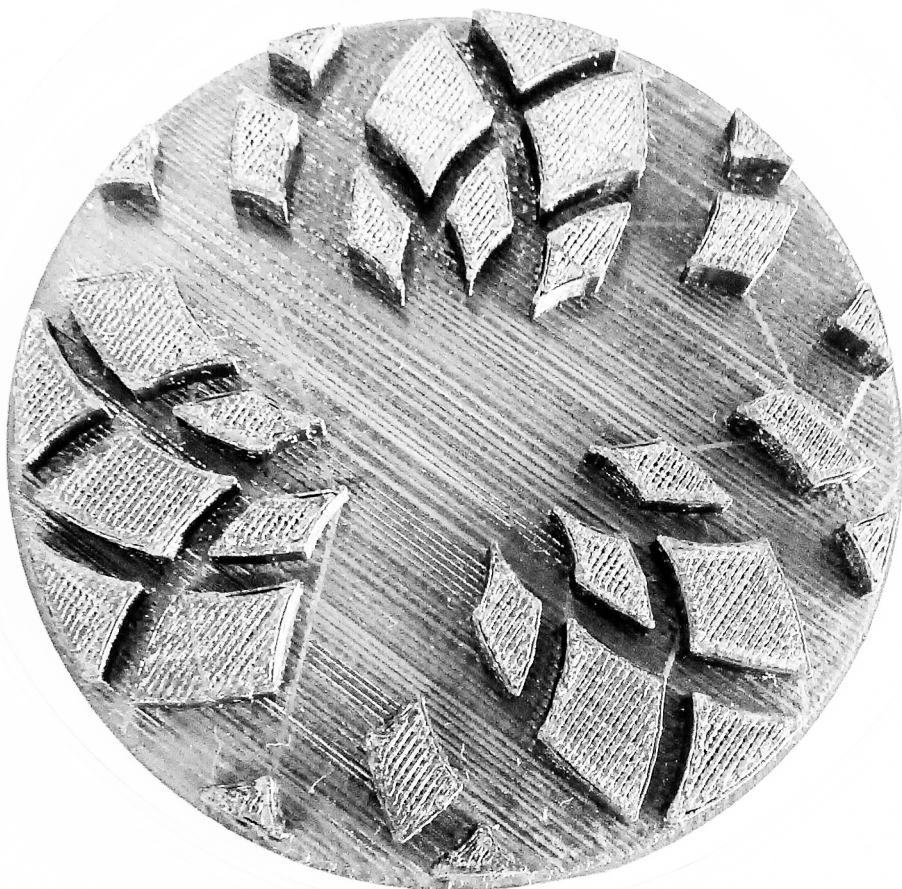
Le maschere vogliono creare una morfologia eterogenea alternando spazi interstiziali a zone di più respiro. La geometria è derivata da studi sulla filotassi.





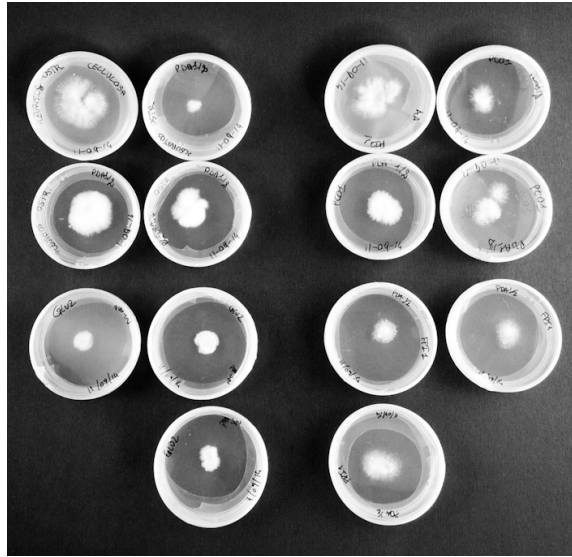


**\_f38** Ponte aereo creato dal micelio connettendo due parti di struttura stampata in 3D  
Ingrandimento al microscopio \_ 32x



\_f39





\_f40



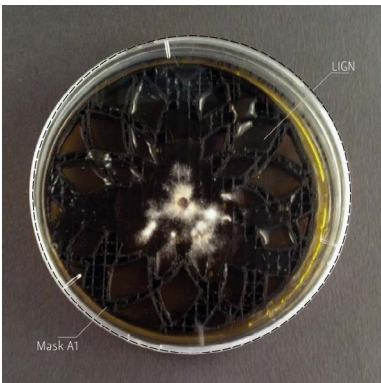
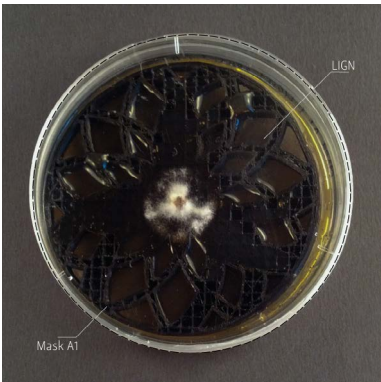
\_f41

**\_f39** La maschera A3. L'ingrandimento mostra la tessitura che rispecchia il percorso macchina fatto dall'estrusore che rilasciava il filamento di PLA. La parte bassa della maschera verrà poi ricoperta da un substrato liquido in modo che solo le parti alte possano emergere. La morfologia dei vuoti permette di valutare il comportamento del micelio in funzione delle varie distanze tra le parti emerse.

**\_f40** Insieme di campioni utilizzati per rigenerare le varie specie di micelio per i successivi esperimenti.

**\_f41** Due maschere di tipo A2 appena inoculate

**SAMPLE #0.2.4**  
**ARMILLARIA MELLEA**  
**INOCULO "A"**  
**CAPSULA** Petri 85mm  
**MASCHERA "A1"**  
**SUBSTRATO** lignina  
**CRESCITA** 6 | 9 | 21 |  
giorni



**SAMPLE #0.2.2**  
**PLEUROTUS OSTREATUS**  
**INOCULO "A"**  
**CAPSULA** Petri 85mm  
**MASCHERA "A3"**  
**SUBSTRATO** cellulosa  
**CRESCITA** 6 | 9 | 21 |  
giorni



## EXPLORING BOUNDARIES

Le maschere sono state sterilizzate (121 °C per 20') all'interno di capsule Petri di vetro, per essere poi inserite in capsule sterili usa-e-getta insieme con il substrato scelto.

I substrati utilizzati sono stati i seguenti:

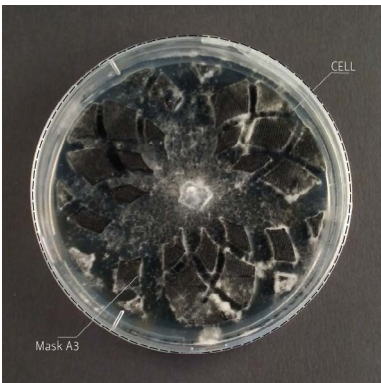
- LIGN \_ Lignosulphonate bretax C 1,5% + AA 1%
- CELL \_ carboxymethyl cellulose sodium salt 1,5% + AA 1%

I miceli selezionati per questa prova:

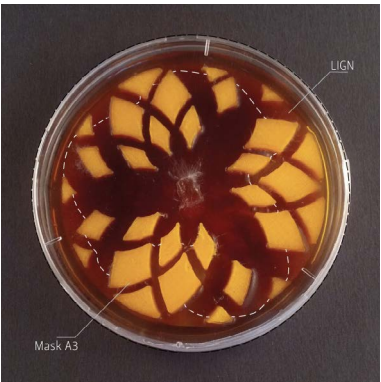
- Pleurotus ostreatus (POS1 \_ ceppo 1)
- Armillaria mellea (ARM1 \_ ceppo 1)
- Ganoderma lucidum (GLU2 \_ ceppo 2)

E' stato interessante notare come, una volta che la colonia si fosse sufficientemente estesa, nelle zone più interstiziali il micelio abbia prodotto ife aeree mostrando effetti di gravi-tropismo. Il Pleurotus Ostreatus in particolare ha creato ponti aerei riuscendo a connettere diversi oggetti delle maschere stampate.

**SAMPLE #0.2.1**  
GANODERMA LUCIDUM  
**INOCULO "A"**  
**CAPSULA** petri 85mm  
**MASCHERA "A1"**  
**SUBSTRATO** cellulosa  
**CRESCITA** 6 | 9 | 21 |  
giorni



**SAMPLE #0.2.0**  
GANODERMA LUCIDUM  
**INOCULO "A"**  
**CAPSULA** petri 85mm  
**MASCHERA "A3"**  
**SUBSTRATO** lignina  
**CRESCITA** 6 | 9 | 21 |  
giorni





\_f42

**\_f42** Particolare del campione #0.2.0 di *Ganoderma Lucidum* su substrato di lignina dopo 21 giorni di crescita. Il micelio aereo si è sviluppato particolarmente in quei punti di transizione tra il substrato e la maschera e centralmente, dove era presente l'inoculo. Molte delle ife aeree sono cresciute fino a toccare il coperchio della capsula creando delle vere connessioni. La verticalità dei cordoni miceliari prodotti mostra la capacità del micelio di avvertire la gravità e crescere di conseguenza (gravitropismo)



## a processing code

Grazie a strumenti come *Processing*<sup>1</sup> è possibile sperimentare ed esplorare in maniera intuitiva nuovi sistemi che relazionino oggetti tra loro attraverso regole e comportamenti codificati.

Un linguaggio di programmazione basato su Java che permette di fare simulazioni avanzate attraverso anche l'utilizzo di librerie specifiche che decodificano fenomeni fisici come forze, molle etc.

Il mio studio parte dalla comprensione di quelli che sono gli *agent-system* e i sistemi di *flocking* applicati nel campo dell'architettura attraverso la simulazione di crescita e morfogenesi<sup>2</sup>. Ognuna delle ife che va a costituire il micelio è difatto interpretabile come un singolo agente capace di diramarsi (branching) e di esplorare lo spazio in funzione della quantità di cibo, degli agenti vicini, di un campo vettoriale.

Ringrazio *co-de-it* per aver condiviso il loro lavoro, punto di partenza fondamentale:

CTRL.SHIFT – the Control Shift | GH+P5 Co-de-iT workshop Vienna – 02>07 April 2013.

Di seguito i vari *step* con i relativi progressi della simulazione.

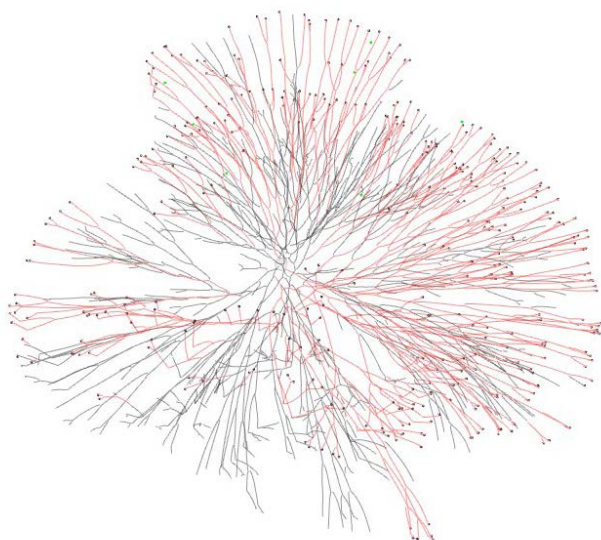
### 0.1

Il sistema di *flocking* solitamente non è pensato per potersi diramare, bensì è un insieme anche variabile di agenti che si muovono nello spazio. Dunque la prima parte di codice ha permesso ad ognuna delle ife di potersi diramare: a partire da un punto iniziale (spora) si è introdotta una variabile "probabilità di branching" che ha permesso di poter variare la possibilità dell'ifa di diramarsi (solo in ma-

<sup>1</sup> Processing v2.1.1

© 2004-2013 Ben Fry and Casey Reas  
© 2001-2004 Massachusetts Institute of Technology

<sup>2</sup> Si è utilizzata la libreria di Jose Sanchez: *Plethora library*,  
<http://www.plethora-project.com/>

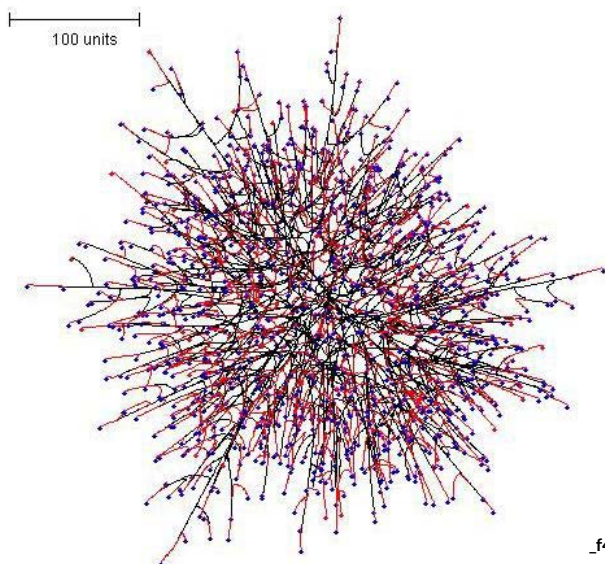


**\_f43** Fermo immagine di una simulazione. Le ife "vive" sono quelle di colore rosso e in cui è evidenziato l'apice radicale. In grigio le ife considerate non più attive.

**\_f44** Fermo immagine del software "Neighbour-Sensing program" v3.7 scritto da Audrius Meskauskas

**\_f43**





\_f44

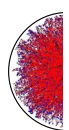
Lattice  
model

Agent  
system

L-system

Cellular  
automata

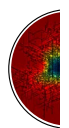
Reaction  
Diffusion



Audrius MESKAUSKAS, at all

## Neighbour-Sensing

Simulating colonial growth of fungi with the Neighbour-Sensing model of hyphal growth



P. BOSWELL, at all

## Mathematical approach

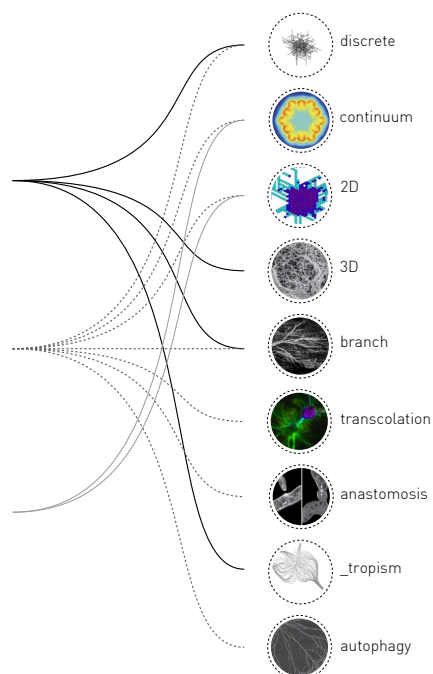
A mathematical approach to studying fungal mycelia



PAULA FERREIRA, at all

## Dispersal scenarios

Modelling fungus dispersal scenarios using cellular automata



\_f45 Diagramma di alcuni modelli per la simulazione di crescita del micelio in relazione alle caratteristiche implementate

niera apicale). Quando viene attivata la funzione `toBranch()`; nasce una nuova ifa a partire dall'ultima posizione di quella designata a diramarsi.

## 0.2

Lo spazio finito in cui far partire la simulazione è costituito da un insieme discreto di punti ognuno dei quali possiede diversi attributi oltre a quella classica del punto (posizione). Questi attributi sono volti all'interpretazione del substrato ovvero la porzione di spazio reale in cui il micelio ha la possibilità di crescere. Si è aggiunto quindi a questi punti l'informazione sulla quantità di cibo presente e dell'influenza (tramite vettore) di un campo che ne indirizzi la crescita.

Questi valori sono caricati da file esterni provenienti da altri studi sul substrato. La probabilità di branching è stata dunque messa in relazione al substrato e alla quantità di cibo: maggiore è la quantità di cibo, più la rete di ife si infittisce.

## 0.3

Dalla serie di ife viene poi implementata la possibilità di creare una *mesh* i cui punti siano funzione delle tracce lasciate dagli agenti in movimento. Il riscontro formale è immediato.

## 0.4

La possibilità di *branching* diventa fondamentale se contrastata dalla "morte" degli agenti. Ogni ifa dunque presenta uno stato *alive* e uno *dead*: muore quando la quantità di cibo all'interno di un determinato raggio è minore di una soglia fissata.

## 0.5

Non solo il micelio è influenzato dal substrato ma anche esso va a modificarsi dopo il passaggio delle ife in quello che può essere considerato un comportamento stigmergico: i nutrienti diminuiscono, i punti cambiano colore sino a scomparire.

## 0.6

Con l'aggiunta di alcuni parametri, come ad esempio la possibilità di cambiare il raggio che definisce lo spazio in cui ogni singolo agente legge l'ambiente, iniziano ad emergere alcune proprietà adattive del sistema nonché i primi risultati interessanti.

## 0.7

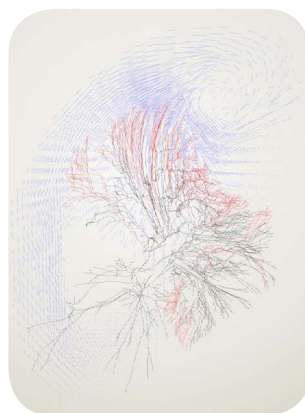
Aumentando la complessità si è qui introdotta l'influenza di un campo vettoriale sul tropismo delle varie ife. Regolabile in un dominio [`minTropismInfluence` ; `maxTropismInfluence`]

## 1.0

Si è introdotta una maschera iniziale che permetta di caricare substrati diversi senza dover uscire dal programma o cambiare righe di codice, la possibilità di avere più spore contemporaneamente e substrati in cui i punti non siano obbligatoriamente disposti secondo una griglia regolare.



\_f46

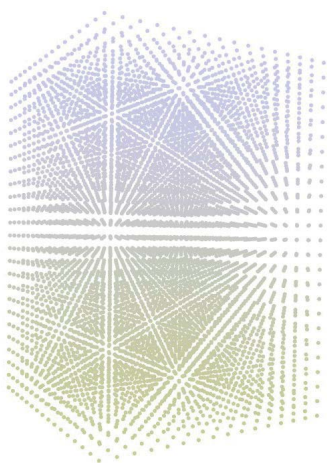


\_f47

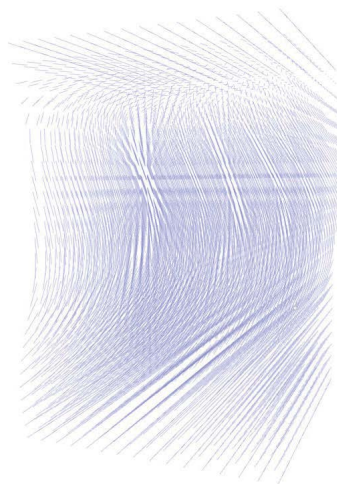
\_f46 Fermo immagine della simulazione. I punti identificano il substrato (e il volume entro il quale avviene la crescita). In questo sketch ci sono due punti di inoculo.

\_f47 In violetto viene evidenziato il campo vettoriale che influenza la direzione di movimento degli agenti.

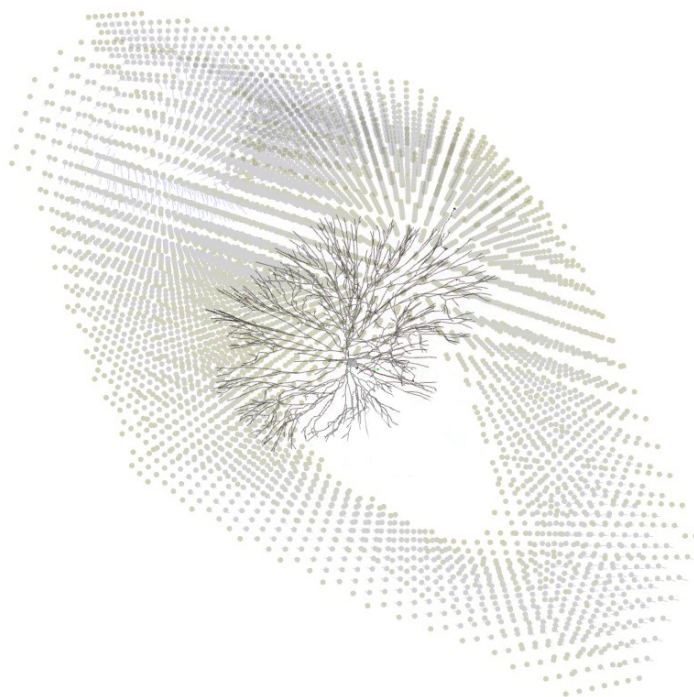
\_f48 Immagine che mostra la variazione del gradiente nel substrato



GRADIENTE DI NUTRIMENTO



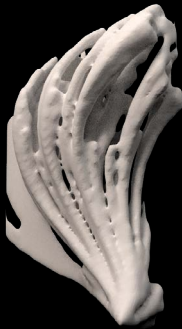
CAMPO VETTORIALE



\_f48



VALUE	NAME
OMO	#
---	GROWTHTIME
0.445	THRES [0:1]
0.0	MINTROPISMINFLUENCE [0.00:0.10]
0.0	MAXTROPISMINFLUENCE [0.00:0.10]
0.5	DENSITY [0.00:0.50]
1.0	COH_RAD [0.0:5.0]
5.0	SEP_RAD [0.0:5.0]
2.0	ALI_RAD [0.0:5.0]
0.875	COHESION [0.0:5.0]
5.0	SEPARATION [0.0:5.0]
1.0	ALIGNMENT [0.0:5.0]
8.0	STIGV [0:100]
0.25	ISO_THRESHOLD [0.0:5.0]
0.5	RAY [0.0:5.0]
FALSE	INVERTER



VALUE	NAME
1010	#
210519.0	GROWTHTIME
0.5	THRES [0:1]
0.0175	MINTROPISMINFLUENCE [0.00:0.10]
0.0675	MAXTROPISMINFLUENCE [0.00:0.10]
0.25	DENSITY [0.00:0.50]
1.0	COH_RAD [0.0:5.0]
5.0	SEP_RAD [0.0:5.0]
2.0	ALI_RAD [0.0:5.0]
0.775	COHESION [0.0:5.0]
5.0	SEPARATION [0.0:5.0]
1.0	ALIGNMENT [0.0:5.0]
8.0	STIGV [0:100]
0.175	ISO_THRESHOLD [0.0:5.0]
1.05	RAY [0.0:5.0]
TRUE	INVERTER



VALUE	NAME
1757	#
1150940.0	GROWTHTIME
0.05	THRES [0:1]
0.025	MINTROPISMINFLUENCE [0.00:0.10]
0.047	MAXTROPISMINFLUENCE [0.00:0.10]
0.30	DENSITY [0.00:0.50]
1.0	COH_RAD [0.0:5.0]
5.0	SEP_RAD [0.0:5.0]
2.0	ALI_RAD [0.0:5.0]
0.2	COHESION [0.0:5.0]
5.0	SEPARATION [0.0:5.0]
1.0	ALIGNMENT [0.0:5.0]
100.0	STIGV [0:100]
0.25	ISO_THRESHOLD [0.0:5.0]
0.75	RAY [0.0:5.0]
TRUE	INVERTER



VALUE	NAME
1729	#
177155.0	GROWTHTIME
0.5	THRES [0:1]
0.0185	MINTROPISMINFLUENCE [0.00:0.10]
0.0475	MAXTROPISMINFLUENCE [0.00:0.10]
0.25	DENSITY [0.00:0.50]
1.0	COH_RAD [0.0:5.0]
5.0	SEP_RAD [0.0:5.0]
2.0	ALI_RAD [0.0:5.0]
0.2	COHESION [0.0:5.0]
5.0	SEPARATION [0.0:5.0]
2.1	ALIGNMENT [0.0:5.0]
100.0	STIGV [0:100]
0.25	ISO_THRESHOLD [0.0:5.0]
1.125	RAY [0.0:5.0]
TRUE	INVERTER

VALUE	NAME
1455	#
343674.0	GROWTHTIME
0.015	THRES [0:1]
0.0555	MINTROPISMINFLUENCE [0.00:0.10]
0.0555	MAXTROPISMINFLUENCE [0.00:0.10]
0.25	DENSITY [0.00:0.50]
1.0	COH_RAD [0.0:5.0]
5.0	SEP_RAD [0.0:5.0]
2.0	ALI_RAD [0.0:5.0]
1.8	COHESION [0.0:5.0]
5.0	SEPARATION [0.0:5.0]
1.0	ALIGNMENT [0.0:5.0]
88.5	STIGV [0:100]
1.8	ISO_THRESHOLD [0.0:5.0]
2.375	RAY [0.0:5.0]
TRUE	INVERTER



### 3.1.3

## (bio) plastic benchmark

Lo sperimentare substrati differenti, adatti alla crescita del micelio, deriva dalla necessità di superare alcuni ostacoli dettati dalle caratteristiche di addensamento proprie dell'*agar agar*. Questo infatti viene preparato a freddo - in forma liquida e a densità dell'acqua - ma tramite il calore dovuto alla sterilizzazione si innesca il processo chimico che ne provoca l'addensamento durante la successiva fase di raffreddamento. Il materiale dunque prende la forma del contenitore entro cui è posto quando ancora è caldo e liquido; una volta raffreddato diviene però molto fragile ed incline alla frattura se provato a modellare.

Visto l'intento di indirizzare la ricerca verso la terza dimensione si sono sperimentati altri materiali in cui il processo di addensamento partisse con il calore (e dunque con la fase di preparazione) in modo da poter avere un minimo di caratteristiche meccaniche iniziali sufficienti ad avere substrati tridimensionali da poter fare colonizzare.

### (BIO)PLASTICA E VISCOSITÀ

Nell'ottica di lavorare con fibro-compositi si è ipotizzato che la (bio)plastica<sup>1</sup> derivante dall'amido potesse essere un substrato adatto alla crescita di microorganismi, mantenendo chiaramente la giusta umidità per tutto il periodo di crescita. La viscosità che permettesse al composto di essere spalma-  
bile su possibili fibre è stata testata tramite diverse prove. Si indicherà qui quella che è parsa più convincente:

*(bio)plastic recipe: #2.1*

- 85% H<sub>2</sub>O
- 6% Starch
- 4% Carboxymethyl cellulose sodium salt
- 3% Glycerol
- 2% PDA – potato dextrose agar
- 0.1% Ammonium Acetate

**/1** Il suffisso (bio) è volutamente inserito tra parentesi per enfatizzarne il carattere aleatorio. Queste "plastiche" vengono definite bio-plastiche perché biodegradabili o perché composte da materie prime rinnovabili.





**\_f49** particolare di un campione di micelio cresciuto su (bio)plastica essiccato.

## I BENCHMARK

Al composto base si sono poi testate 3 varianti per capire quale favorisse maggiormente la crescita del micelio valutando velocità di crescita e compattezza delle ife:


- #2.1.1 > #2.1 + 1% Glucose
- #2.1.2 > #2.1 + 1% Lignosulphonate bretax C
- #2.1.3 > #2.1 + 1% Oak dust

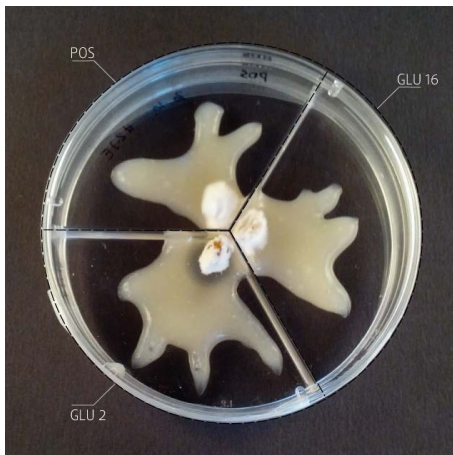
Dunque si sono preparate 4 capsule Petri tripartite.


Ognuno dei settori si è inoculato con 3 tipi di micelio diverso:

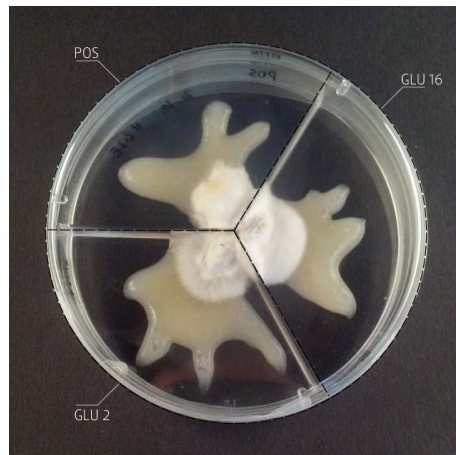
- Pleurotus Ostreatus (POS1 - ceppo 1)
- Ganoderma Lucidum (GLU2 - ceppo 2)
- Ganoderma Lucidum (GLU16 - ceppo 16)

Il substrato con il ligninsolfonato (sostanze organiche derivanti dalla lignina, sottoprodotti della produzione della cellulosa) ha mostrato i risultati migliori favorendo la crescita soprattutto del GLU16 e del POS1.

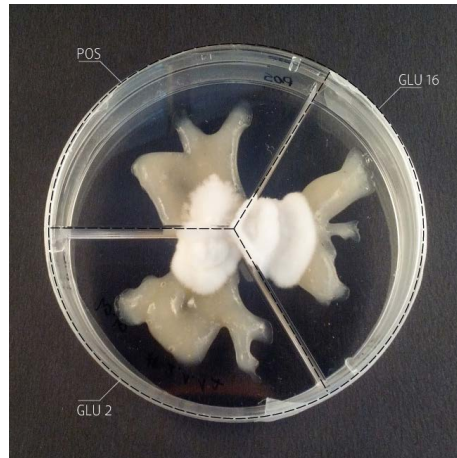
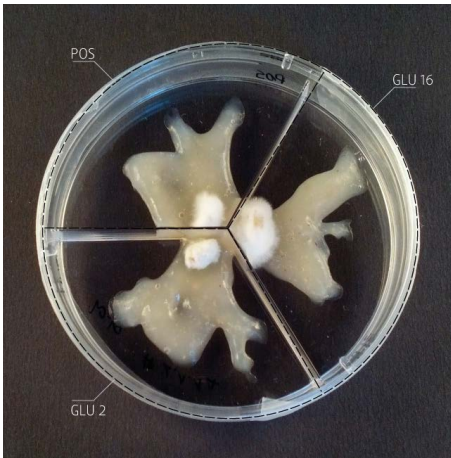
**SAMPLE #2.1E**  
POS-GLU16-GLU2  
**INOCULO "B"**  
**CAPSULA** petri tripartita 85mm  
**SUBSTRATO** (bio) plastica #2.1  
**CRESCITA** 



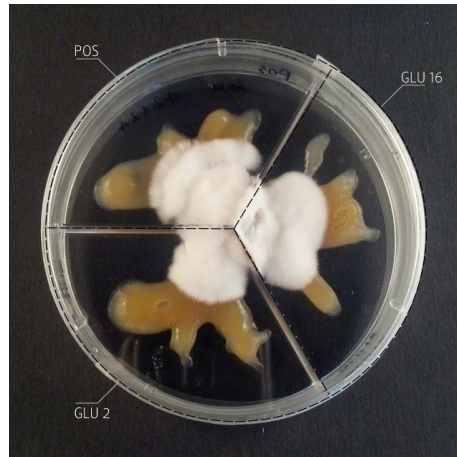
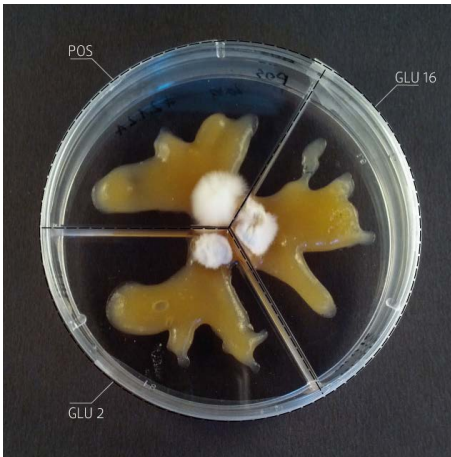
A lato >  
**SAMPLE #2.1.1A, #2.1.2A, #2.1.3A**  
POS-GLU16-GLU2  
**INOCULO "B"**  
**CAPSULA** petri tripartita 85mm  
**SUBSTRATO** (bio)pl. #2.1.1, #2.1.2, #2.1.3  
**CRESCITA** 



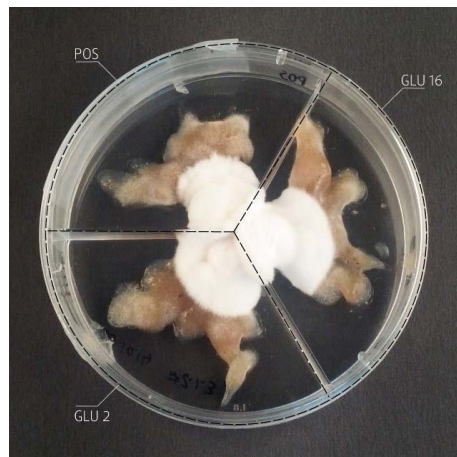
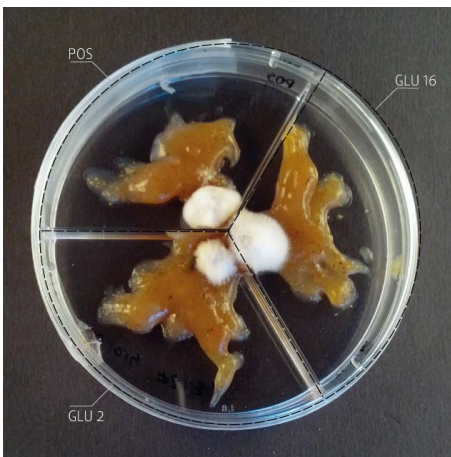
SAMPLE\_#2.1.1A



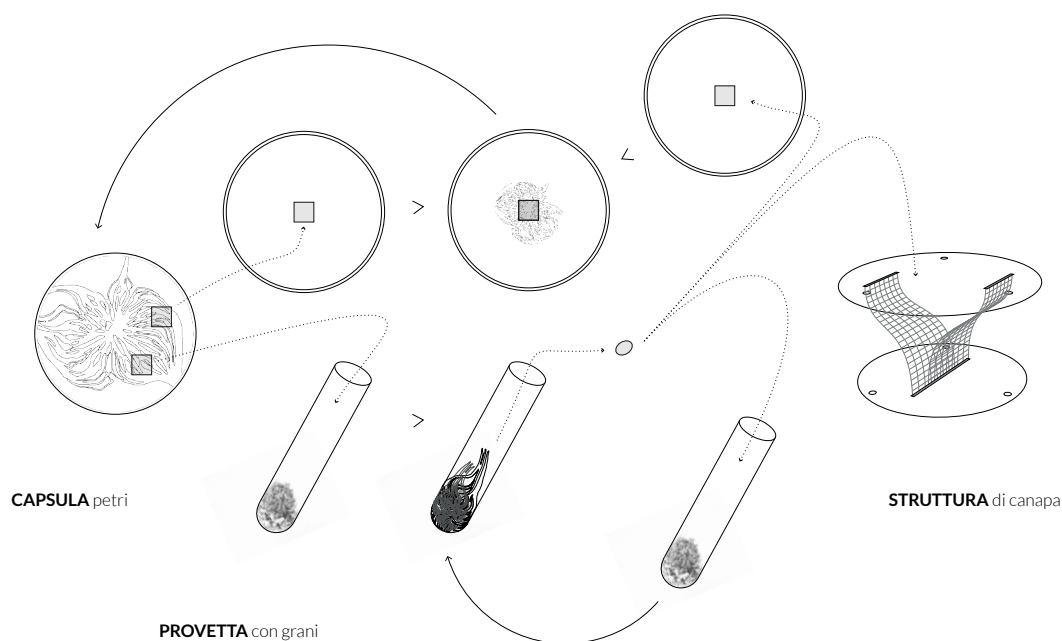
SAMPLE\_#2.1.2A



SAMPLE\_#2.1.3A



# l'inoculo



L'inoculo è quella porzione di micelio che viene utilizzata per colonizzare un nuovo substrato. Come già visto, la riproduzione del micelio può appunto venire tramite clonazione.

Lo schema mostra il processo reiterato mediante il quale si sono preparate quelle piastre o quelle provette necessarie per poter inoculare i campioni oggetto di studio nonché le varie strutture di canapa.

A partire da una piastra, in cui la colonia ha già colonizzato tutto il substrato fino ad arrivare ai margini della capsula Petri, vengono tagliate delle piccole porzioni (gli inoculi appunto); questo procedimento avviene sempre sotto cappa a flusso laminare e utilizzando strumenti sterilizzati. Le porzioni vengono prelevate dalla piastra "madre" ed utilizzate per inoculare sia i vari campioni, sia almeno un'altra piastra che permetta di reiterare il procedimento in futuro (rigenerare il micelio). Le provette con i grani (15g di grani e 15ml di acqua sterilizzati a 121° per 20') hanno seguito lo stesso processo e sono risultate più comode per poter generare tanti piccoli inoculi per poter colonizzare le varie strutture di canapa. La rigenerazione del micelio (in piastra o in provetta) serve per tenere il micelio "vivo" e soprattutto attivo: alcune parti della colonia possono essere più attive di altre il che influisce positivamente sulle tempistiche di crescita e colonizzazione una volta usate come inoculi.





**\_f50** Provetta con grani prima di essere inoculata (t=0)

**\_f51** Provetta in cui il micelio è cresciuto ed i grani sono pronti per essere utilizzati (t=1)

**\_f52** Campioni saturi di micelio. I grani rimangono coesi grazie all'azione cementante del micelio (t=3)

**\_f53** Porzione di struttura inoculata con grani infetti di *Pleurotus Ostreatus*. La struttura è sterile e per evitare inquinamento si lavora sotto cappa a flusso laminare.

## 3.1.4

### (bio) plastic & fibre

L'ipotesi di utilizzare un sistema fibro-composito è stata avanzata grazie alla praticità di poter lavorare con un materiale che fornisse una struttura tridimensionale di partenza: un substrato 3D che avesse caratteristiche meccaniche di base e allo stesso tempo fornisse il nutrimento necessario per la crescita del micelio. Si è quindi indagata la fibra di canapa, in particolare la canapa sfilacciata, partendo sempre da esperimenti in vitro.

#### FIBRA DI CANAPA

Un primo passo è stato quello di verificare che effettivamente il micelio crescesse su un substrato solido, fibroso, come la canapa. Questa è stata immersa in acqua per 24h in modo che assorbisse un sufficiente quantitativo di H<sub>2</sub>O utile per assicurare l'umidità necessaria alla crescita del micelio. Si è poi inserita in capsule Petri senza preoccuparsi della sterilità. Era difatti necessario capire se il substrato fosse colonizzabile da microorganismi in generale.

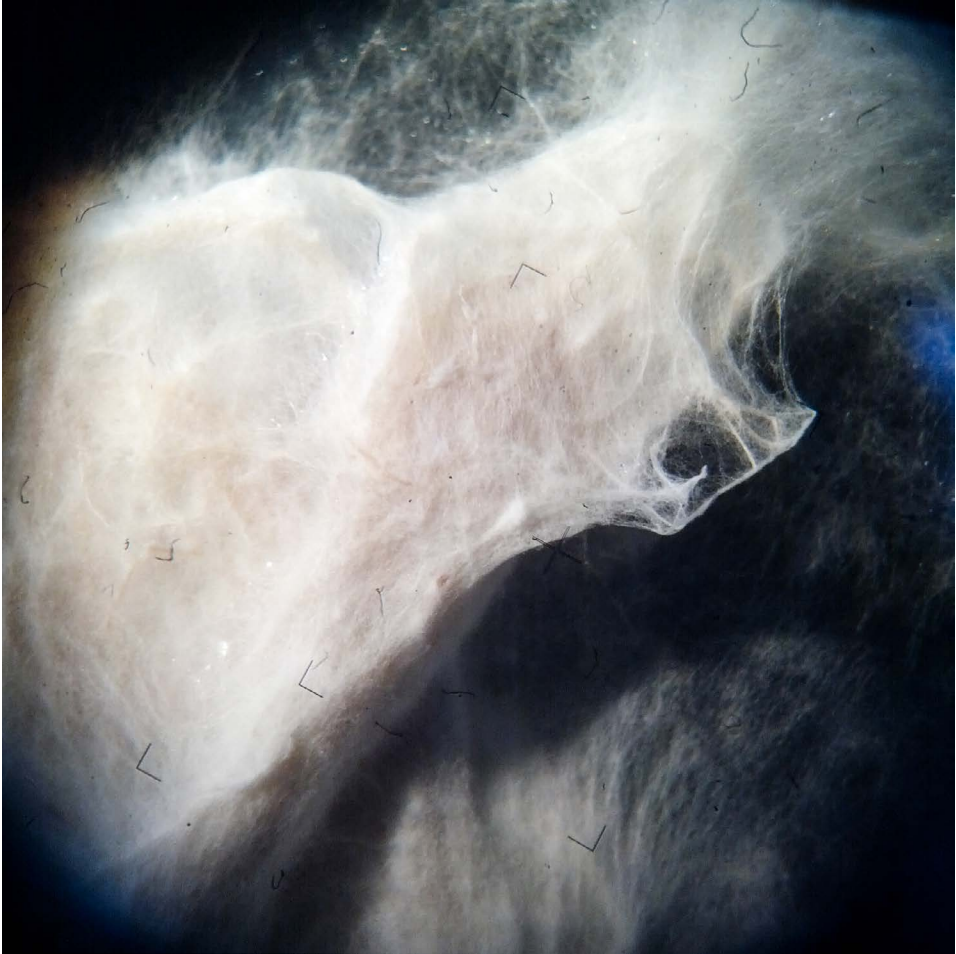
I miceli utilizzati per questa prova sono stati:

- Pleurotus Ostreatus (POS1 - ceppo 1)
- Ganoderma Lucidum (GLU16 - ceppo 16)

I risultati sono apparsi soddisfacenti. Il GLU16 è cresciuto lentamente anche se più compatto, mentre il POS1 ha mostrato caratteristiche interessanti di differenziazione nonché una velocità di crescita molto più elevata.

Dopo 11 giorni di crescita si è deciso di aprire i campioni per verificare gli effetti dell'essiccazione. Il micelio difatti è composto per l'80% d'acqua oltre a quella contenuta nella canapa. L'essiccazione è avvenuta a temperatura ambiente (22°C ca.) in modo da ridurre il più possibile gli effetti di ritiro. Dopo due giorni i campioni erano completamente secchi. Il POS1 ancora una volta si è mostrato più performante. Ad un'analisi qualitativa il provino appare solido e robusto con un netto aumento delle caratteristiche meccaniche inizialmente pressoché nulle.

Nonostante l'assenza di sterilità i campioni non sono risultati inquinati.



\_f54 Ingrandimento al microscopio \_12x di Pleurotus Ostreatus cresciuto su canapa.



**SAMPLE #2.0A**  
**PLEUROTUS OSTREATUS**  
**INOCULO** grano infetto (1 chicco)  
**CAPSULA** Petri 45mm  
**SUBSTRATO** canapa  
**CRESCITA** 4 | 8 | 11 |  
giorni



\_f55



\_f56



\_f57

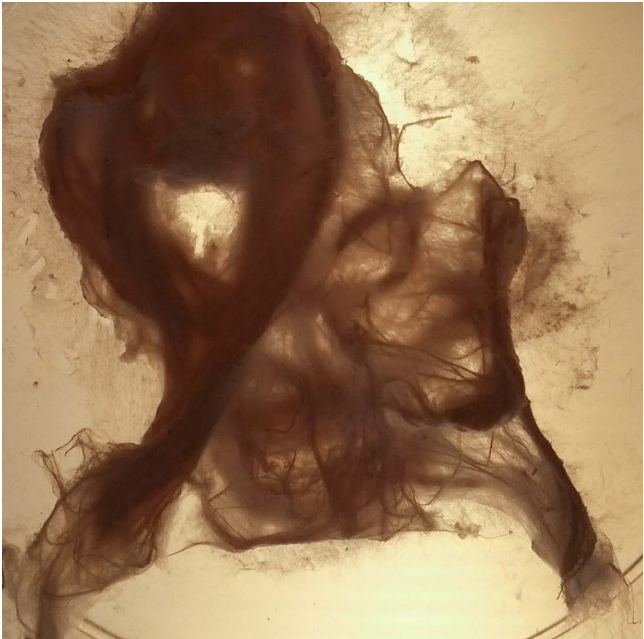


\_f58

\_f55 dettaglio al microscopio, 8x  
\_f56 dopo 4 giorni  
\_f57 dopo 8  
\_f58 dopo 11 giorni  
> a lato  
\_f59 dopo 5 giorni di essiccazione  
\_f60 controluce



\_f59



\_f60

## FIBRA E (BIO)PLASTICA

Analogamente si è proceduto studiando l'interazione della canapa con la (bio)plastica e di come possa fornire un substrato ideale per gli scopi prefissi.

Si è aumentata la scala della capsula Petri - passando da 4 a 8.5 cm di diametro - e una volta depositata la canapa si è spalmata la (bio)plastica cercando di coprire l'intera superficie occupata dalle fibre. Per velocizzare il processo si sono inseriti 3 diversi inoculi piuttosto che uno solo centrale.

Il micelio utilizzato in questo campione è:

- Pleurotus Ostreatus (POS1 - ceppo 1)

La composizione della (bio)plastica è la #2.1.2 :

- 85% H<sub>2</sub>O
- 6% Starch
- 4% Carboxymethyl cellulose sodium salt
- 3% Glycerol
- 2% PDA - potato dextrose agar
- 1% Lignosulphonate betax C
- 0.1% Ammonium Acetate

La crescita è avvenuta per 15 giorni. Anche questa prova è stata preparata senza assicurarsi della sterilità per una questione di tempo e velocità. Il campione è risultato inquinato, probabilmente da *aspergillus nigris*, che però non ha causato l'invalidamento della prova: il POS1 è stato comunque più forte e ha dominato il substrato contro il *competitor*.

Lasciato essiccare all'aria per 3-4 giorni, il campione è apparso compatto e solido, acquisendo una buona resistenza a trazione che è stata possibile valutare solo qualitativamente.



### SAMPLE #2.1.B

PLEUROTUS OSTREATUS

**INOCULO** grano infetto (3 chicchi)

**CAPSULA** Petri 85mm

**SUBSTRATO** canapa + (bio)plastica

**CRESCITA** 4 | 11 | 15 |  
giorni



**\_f61** Particolare del campione dopo 3 giorni di essiccamento all'aria





**\_f62** Vista controluce





## 3.1.5

### hemp

### benchmark 3D

Si è passati allo studio della crescita del micelio su semplici strutture di canapa tridimensionali che ne potessero evidenziare i comportamenti e le caratteristiche. Si sono quindi preparati tre diversi test disponendo i fasci di canapa verticalmente con l'ausilio di piattini in legno, precedentemente tagliati al laser, che permettessero un controllo sulla disposizione delle fibre.

#### OPERAZIONI SEQUENZIALI

- Progetto e taglio laser dei piattini: pioppo, diametro 60 mm, spessore 4mm
- Costruzione delle strutture: distanza tra i piatti di 100 mm
- 24h di immersione in H<sub>2</sub>O
- Preparazione dei barattoli con alcuni ml di acqua distillata sul fondo
- Sterilizzazione in autoclave, 121°C – 20'
- (bio)plastica #2.1.2 viene spalmata sulle fibre in ambiente sterile (sotto cappa a flusso laminare)
- Ogni struttura viene inoculata con 1 chicco di grano già colonizzato da *Pleurotus Ostreatus* (POS1)
- La crescita avviene in assenza di luce alla temperatura di 22,5°C per 12 giorni

La forma data alle tre strutture è volta alla comprensione dei meccanismi esplorativi e di crescita del POS1 in relazione alle proprietà chimico-meccaniche della canapa. Si è cercato di valutare la possibilità del micelio di creare connessioni tra le varie fibre, analizzando le distanze massime che permettessero la costruzione di ponti.

Lo studio ha mostrato risultati interessanti. Innanzitutto l'intera superficie della canapa è stata colonizzata dal micelio in tempistiche più che ragionevoli (12 giorni). Durante il periodo di crescita si è inoltre valutata la rigidità delle varie strutture ponendole per qualche secondo in orizzontale (effetto mensola): mentre inizialmente la canapa si piegava sotto l'effetto della gravità e del peso di uno dei due piattini, più il micelio cresceva più le connessioni create con la canapa ne irrobustivano la struttura vincendo così le varie forze verticali.

Dopo l'essiccamento si è notata una perdita di volume e un incremento ulteriore delle caratteristiche meccaniche.



\_f63 Particolare del campione #3.0.1.b





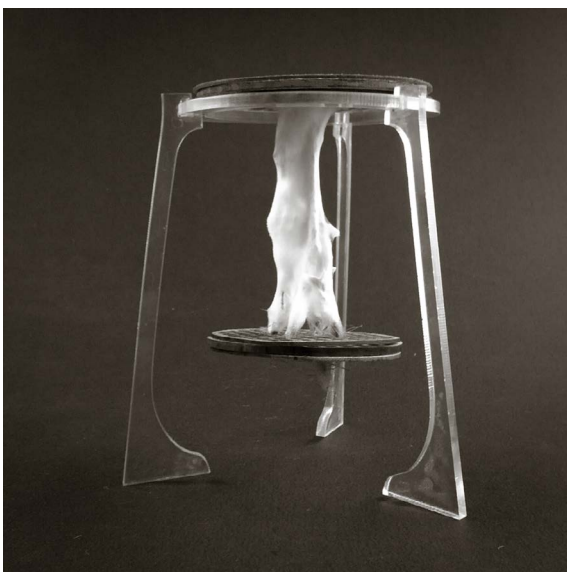








**SAMPLE #3.0.3.B**  
**PLEUROTUS OSTREATUS**  
**INOCULO** grano infetto (1 chicco)  
**BARATTOLO** h 65mm  
**SUBSTRATO** canapa + (bio)plastica  
**CRESCITA** | 0 16 |  
giorni





## 3.1.6

### (bio) analogic computation

Crescendo leggermente di scala si è indagato il sistema in maniera analogica. L'esplorazione è frutto di diverse configurazioni in cui, manualmente, si è cercato di preparare un sistema di partenza che confermasse i *benchmark* già effettuati e contemporaneamente si soffermasse sul valore estetico.

#### OPERAZIONI SEQUENZIALI

- Progetto e taglio laser dei piattini: plexiglas, diametro 75/88 mm, spessore 3mm
- Costruzione della struttura: distanza tra i piatti di 150 mm
- Sterilizzazione in autoclave all'interno di un barattolo di vetro con alcuni ml di acqua sul fondo, 121°C per 20'
- (bio)plastica #2.1.2 viene spalmata sulle fibre in ambiente sterile (sotto cappa a flusso laminare)
- Inoculato con 5 chicchi di grano già colonizzato da *Pleurotus Ostreatus* (POS1)
- La crescita avviene in assenza di luce alla temperatura di 22,5°C per 12 giorni

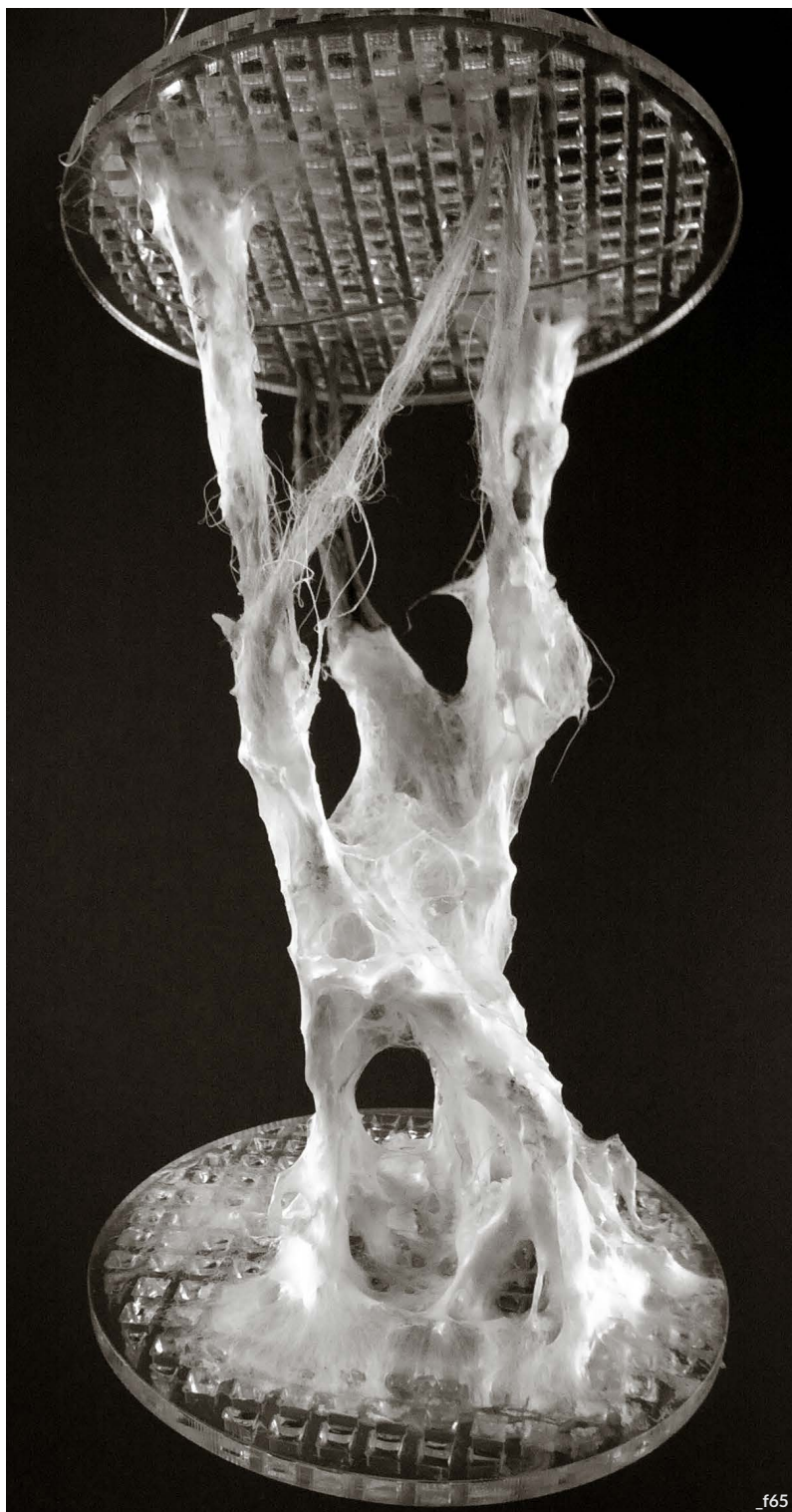
Il campione è risultato inquinato. In alcuni punti pertanto il POS1 non è riuscito a crescere prediligendo altre direzioni. Ad ogni modo è stato utile confrontare le porzioni di struttura colonizzate dal micelio con quelle invece inquinate. Queste ultime risultano chiaramente parti più deboli e flessibili. L'effetto appiattito e smussato che caratterizza questo campione è stato frutto di una casuale immersione in acqua.

La parte centrale è quella dove le fibre di canapa risultavano più vicine ed intrecciate tra di loro; qui il micelio ha avuto modo di crescere e connettersi in maniera molto consistente dando origine ad una composizione materica molto caratteristica. La struttura originaria ha subito forti modifiche non solo a livello formale. La differenziazione del micelio e la quantità di connessioni conferiscono compattezza e rigidità alla struttura evidenziando aspetti contemporaneamente strutturali ed ornamentali.

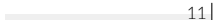
Interessanti i comportamenti ai confini in cui la negoziazione tra crescita esplorativa e crescita riproduttiva (in presenza di nutrimento) riesce a mediare tra la parte materica propria dell'esplorazione e i supporti esterni (considerabili come preesistenze e condizioni al contorno).



\_f64 Particolare del campione #3.1.1



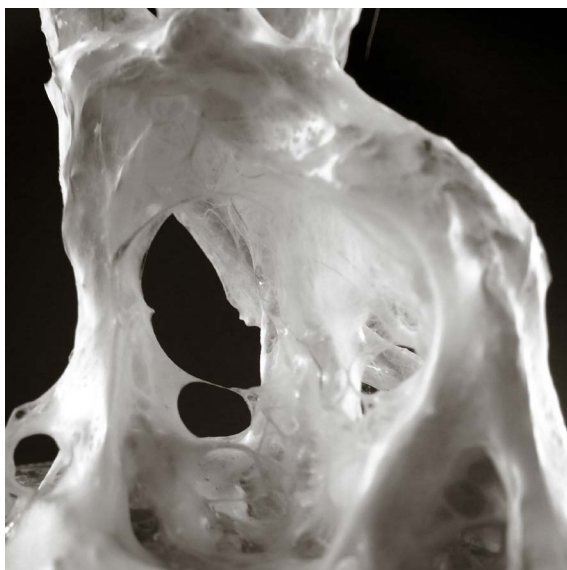


**SAMPLE #3.1.1**  
**PLEUROTUS OSTREATUS**  
**INOCULO** grano infetto (5 chicchi)  
**BARATTOLO** h 150mm  
**SUBSTRATO** canapa + (bio)plastica  
**CRESCITA**  11 |  
giorni



\_f66

\_f67



**\_f65** Vista intera del campione  
**\_f66** Dettaglio centrale. Interessante come il micelio abbia contaminato la piastra di base in plexiglas: negoziazione con limiti fisici.  
**\_f67** Da notare i ponti di connessione creati dal micelio.





\_f68

\_f68 Vista laterale

\_f69 Ingrandimento del  
campione, l'effetto *smooth* è dovuto  
all'appiattimento delle ife aeree a causa  
di una immersione in acqua



f69

## 3.1.7

### wall & mix benchmark

La canapa sfilacciata presenta una certa flessibilità nella distribuzione delle fibre. Considerare la possibilità di ottenere configurazioni diverse rispetto alla condizione sino ad ora esplorata permette di ordinare i fasci di fibre in diversi *layers* a cui far corrispondere gerarchie di comportamenti e livelli di performance differenti.

I seguenti test tendono ad enfatizzare il carattere ornamentale delle strutture di base su cui far crescere il micelio. Il sistema è definito "wall" per via del carattere bidimensionale che presenta la disposizione delle fibre.

#### OPERAZIONI SEQUENZIALI

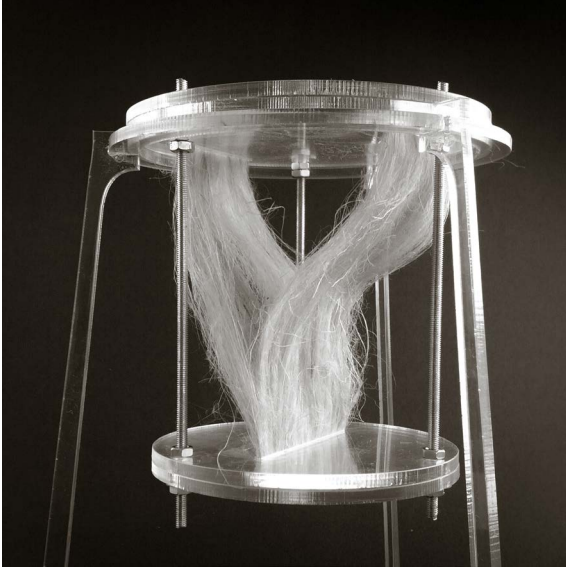
- Progetto e taglio laser dei piattini: plexiglas, diametro 85/96 mm, spessore 3mm
- Costruzione della struttura: distanza tra i piatti di 50/85 mm
- Sterilizzazione in autoclave, all'interno di un barattolo di vetro con alcuni ml di acqua sul fondo, 121°C per 20'
- (bio)plastica #2.1.2 spalmata sulle fibre in ambiente sterile (sotto cappa a flusso laminare)
- Inoculo con alcuni chicchi di grano già colonizzato da *Pleurotus Ostreatus* (POS1)
- La crescita avviene in assenza di luce alla temperatura di 22,5°C per 17 giorni

I risultati mostrano interessanti comportamenti di crescita. Il micelio segue la direzione data dalla canapa enfatizzando però l'aleatorietà; alcune delle fibre che si discostano maggiormente dall'andamento globale permettono alle ife di aumentare lo spazio esplorativo dando origine a possibilità connettive interessanti e negoziazione con i confini e/o le preesistenze.

La differenziazione della canapa, ottenuta tramite densità variabili, ha dirette implicazioni sulla crescita del micelio come mostra il campione #3.2.3.



\_f70 Particolare del campione #3.2.1



**SAMPLE #3.2.1**  
**PLEUROTUS OSTREATUS**  
**INOCULO** grano infetto (10+ chicchi)  
**BARATTOLO** h 85mm  
**SUBSTRATO** canapa + (bio)plastica  
**CRESCITA** | 0 ————— 17 |  
giorni









\_f71

\_f72



**\_f71\_f72\_f73** Viste del campione #3.2.1

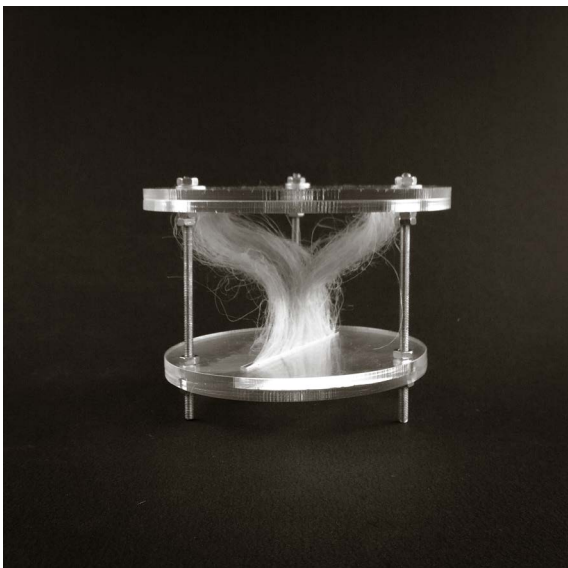
Il micelio fornisce un carattere di unità al sistema rispetto alla sua condizione iniziale. La disposizione della canape - e dunque le curvature della struttura - è funzione solo della distanza dei piatti e della lunghezza delle fibre.

Il nodo centrale, dove il fascio si sdoppia, viene irrigidito dalle connessioni create dalle ife e ordite in diverse direzioni.

Ai margini del sistema si nota come il micelio tenda sempre ad avere un carattere esplorativo: si è aggrappato ad una delle barre filettate, auto-organizzandosi in modo da dare origine a curvature di minimal-surface.

**\_f73**





**SAMPLE #3.2.2**  
**PLEUROTUS OSTREATUS**  
**INOCULO** grano infetto (10+ chicchi)  
**BARATTOLO** h 50mm  
**SUBSTRATO** canapa + (bio)plastica  
**CRESCITA** | 0 17 |  
giorni







**SAMPLE #3.2.3**

PLEUROTUS OSTREATUS

**INOCULO** grano infetto (10+ chicchi)

**BARATTOLO** h 85mm

**SUBSTRATO** canapa + (bio)plastica

**CRESCITA** 0  28 |  
giorni







# SIMULAZIONI E MODELLI FINALI

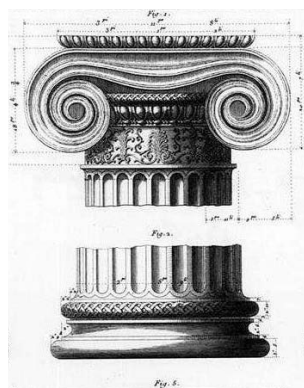
---

Un'indagine progettuale di approccio materialista implica necessariamente delle riflessioni sul concetto di scala. Consideriamo ad esempio le proprietà fisiche per cui una goccia rimane aderente ad una superficie perfettamente orizzontale orientata verso il basso. Ciò che caratterizza questo sistema è l'equilibrio raggiunto tra la coesione e l'adesione delle molecole di materia, tra la tensione superficiale e il peso; l'acqua assume la forma della goccia ed una sua precisa estetica. Pensare di uscire da quella scala, aumentando le dimensioni diciamo di 10 volte, non implica che vengano scalate anche le proprietà fisiche: la tensione superficiale non sarà più sufficiente per equilibrare il peso (che invece è stato scalato) e l'acqua diventerà una materia informe. L'indagine deve dunque essere multi-scalare, in modo da esplorare quali caratteristiche vengono mantenute, quali diventano ininfluenti o cosa invece può emergere in maniera inaspettata da una scala all'altra.

*Living Fiber* è un sistema composito basato sull'auto-organizzazione delle fibre di canapa come substrato eterogeneo e tri-dimensionale su cui far crescere il micelio. Le dimensioni sono cilindriche, di diametro 18cm ed altezza 35cm circa, così da sfruttare il volume massimo consentito dall'autoclave<sup>1</sup>. La scala di *Living Fiber* è circa 2-3 volte più grande delle altre esplorazioni e *benchmark* fin qui indagati, alcune differenze sono emerse: la canapa ad esempio (analogamente alla goccia d'acqua) ha diminuito le sue caratteristiche flessionali enfatizzando oltretutto un'andatura ondeggiante<sup>2</sup> impercettibile ad una scala minore. Il volume cilindrico, che limita lo spazio entro cui è possibile operare, rimanda per analogia ai sistemi verticali. Primo fra tutti la colonna greca, che incorpora in sé caratteristiche strutturali e decorative. La tettonica che si intende studiare qui però cerca di rivedere quelle che sono le gerarchie architettoniche in un'ottica di differenziazione piuttosto che di un ornamento subordinato alla struttura. Ci si riferisce piuttosto agli esperimenti di Frei Otto, dove la tettonica si esprime attraverso l'organizzazione spaziale della lana bagnata, capace di coniugare aspetti strutturali ed estetici in un unico sistema continuo.

<sup>1</sup> Come nelle altre prove, alla struttura deve essere assicurata la sterilità prima della colonizzazione da parte del micelio.

<sup>2</sup> La canapa sfilacciata viene venduta avvolta in rocchetti. Se distesa per essere utilizzata tende a mantenere memoria della forma originaria dando origine ad un movimento ondulato.



\_f74

### ORDINE IONICO

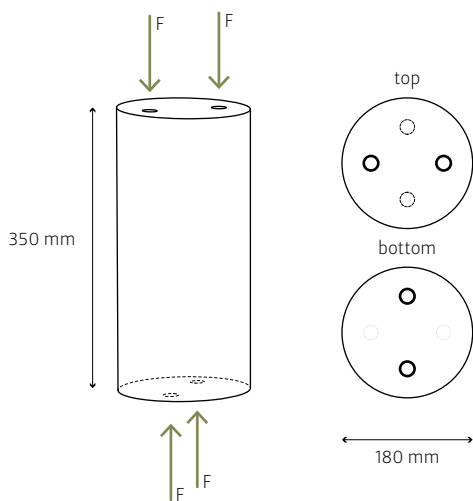
Julien David Le Roy (1724-1803) -  
Ruins of the Most Beautiful Monuments  
of Greece  
<http://en.wikipedia.org/>



\_f75

### LANA BAGNATA

esperimenti di Frei Otto,  
<http://goo.gl/eRTZHm>

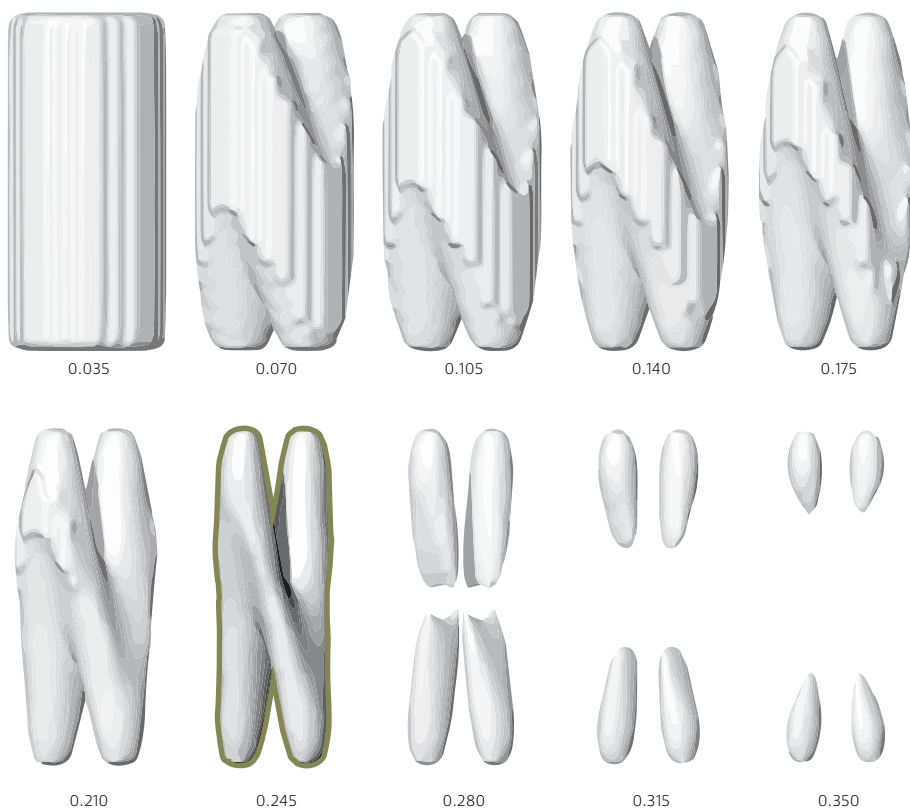


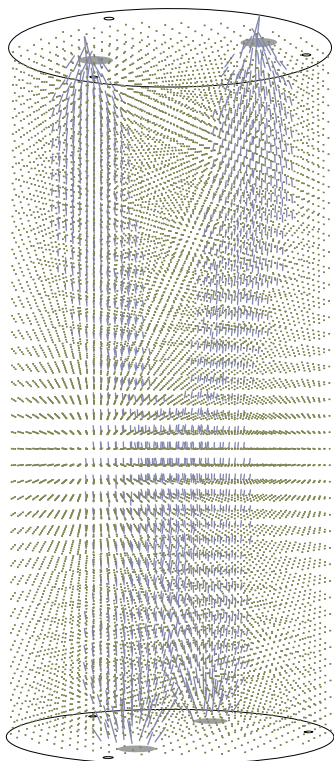
## condizioni al contorno

> Il volume di massimo ingombro, pensato come corpo rigido, è stato caricato virtualmente con 4 forze come in figura. Questo ha permesso di individuare un sottovolume degli sforzi interni.

^ Esclusi quei punti materiali in cui le sollecitazioni interne erano minori di una specifica soglia, si è disegnata una mesh che racchiudesse il volume sollecitato. In verde si è evidenziato il compromesso tra resistenza e quantità di materia impiegata.

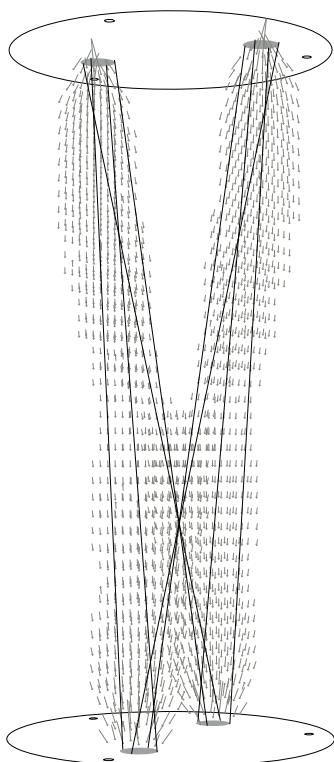
### ISOVALUE



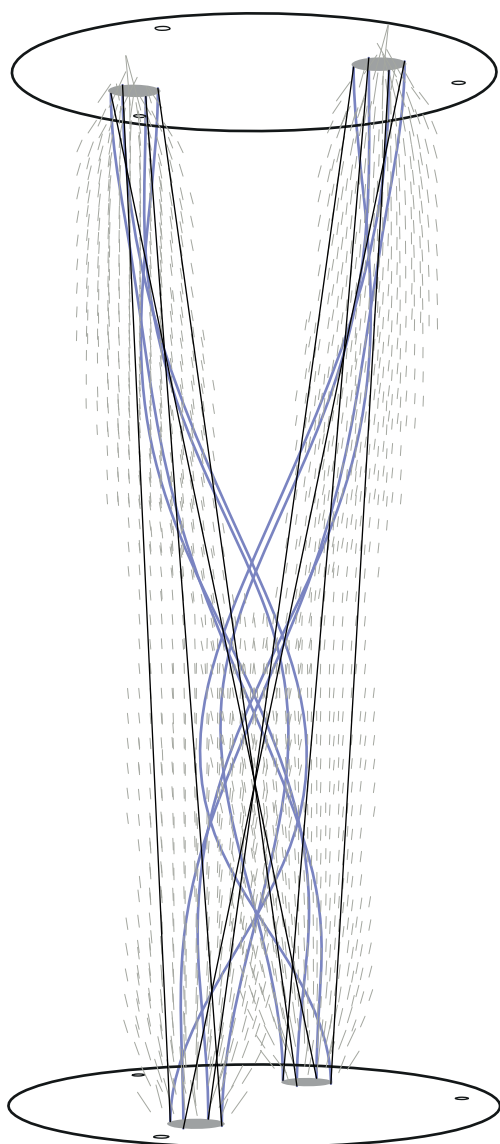


> Il volume è stato discretizzato in punti. In violetto sono evidenziati i vettori degli sforzi di modulo proporzionale all'intensità.

^ Il sottovolume evidenziato dal campo vettoriale in grigio sarà quello entro il quale far lavorare il sistema fibroso di canapa. Le linee nere sono il punto di partenza della simulazione del comportamento dei fasci di canapa.

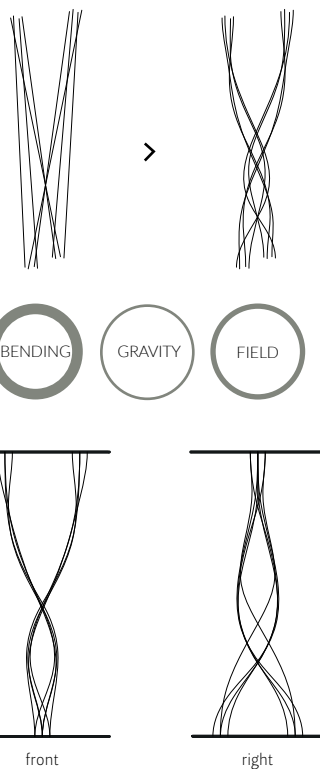


## core-form



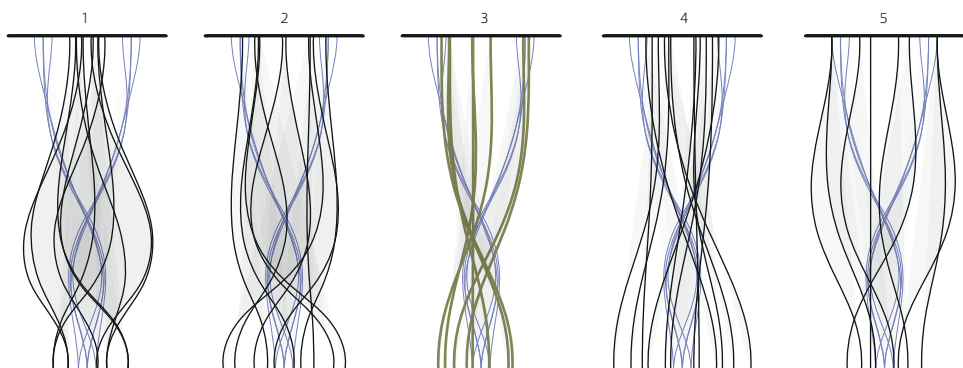
^ Le linee rette indicano la minima distanza che intercorre tra due punti delle rispettive piastre. La simulazione permette di valutare il comportamento dei fasci di canapa a cui viene assegnata una lunghezza maggiore di quella iniziale

> In violetto la configurazione deformata. Il tentativo è quello di far sì che i fasci di canapa rientrino all'interno del volume degli sforzi massimi (campo vettoriale grigio)

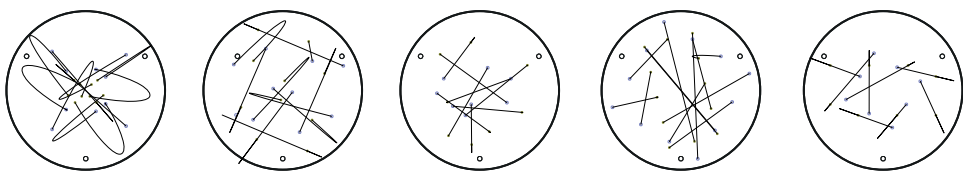


## VARIAZIONI

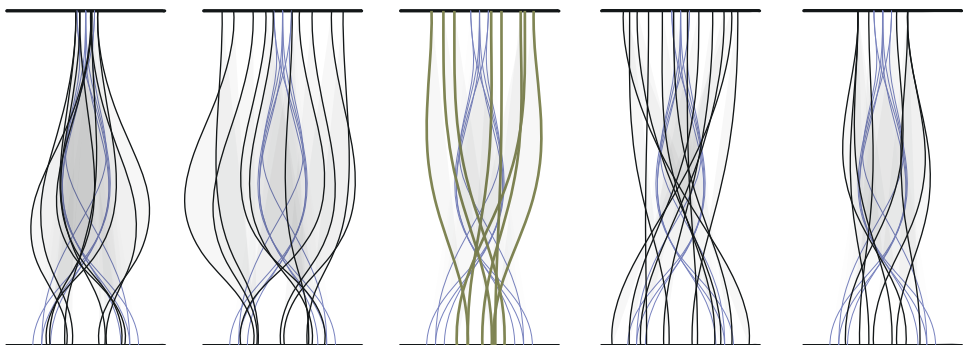
Un secondo ordine viene aggiunto al primo sistema di canapa. La diversa organizzazione del materiale, in funzione dei punti di inizio e fine delle varie fibre, produce estetiche differenti.



< FRONT >



< TOP >



< RIGHT >

A. Curve sub: 10.0  
A. Pull strenght: 4.0  
A. Stiffness: 30.0  
A. Bend strenght: 100.0  
A. % lenght: 1.2  
A. Final lenght: 461.025047  
B. % lenght: 1.1  
B. Final lenght: 421.246258  
B. Stiffness: 300.0  
B. Bend strenght: 300.0  
B. Shift 1: 7.0  
B. Shift 2: -2.0  
B. Seed 2: 2.0  
B. Gravity: 6.0

A. Curve sub: 10.0  
A. Pull strenght: 4.0  
A. Stiffness: 30.0  
A. Bend strenght: 100.0  
A. % lenght: 1.2  
A. Final lenght: 461.025047  
B. % lenght: 1.1  
B. Final lenght: 423.283234  
B. Stiffness: 300.0  
B. Bend strenght: 300.0  
B. Shift 1: 7.0  
B. Shift 2: -2.0  
B. Seed 2: 10.0  
B. Gravity: 7.0

A. Curve sub: 10.0  
A. Pull strenght: 4.0  
A. Stiffness: 30.0  
A. Bend strenght: 100.0  
A. % lenght: 1.2  
A. Final lenght: 461.025047  
B. % lenght: 1.03  
B. Final lenght: 0  
B. Stiffness: 300.0  
B. Bend strenght: 728.0  
B. Shift 1: 6.0  
B. Shift 2: 5.0  
B. Seed 2: 0.0  
B. Gravity: 4.0

A. Curve sub: 10.0  
A. Pull strenght: 4.0  
A. Stiffness: 30.0  
A. Bend strenght: 100.0  
A. % lenght: 1.2  
A. Final lenght: 461.025047  
B. % lenght: 1.02  
B. Final lenght: 407.674497  
B. Stiffness: 300.0  
B. Bend strenght: 728.0  
B. Shift 1: 6.0  
B. Shift 2: -10.0  
B. Seed 2: 0.0  
B. Gravity: 8.0

A. Curve sub: 10.0  
A. Pull strenght: 4.0  
A. Stiffness: 30.0  
A. Bend strenght: 100.0  
A. % lenght: 1.2  
A. Final lenght: 461.025047  
B. % lenght: 1.05  
B. Final lenght: 399.363901  
B. Stiffness: 300.0  
B. Bend strenght: 728.0  
B. Shift 1: 6.0  
B. Shift 2: -5.0  
B. Seed 2: 0.0  
B. Gravity: 8.0





**PROSPECTIVE**

## living fiber 01

### **SAMPLE #3.3.2**

PLEUROTUS OSTREATUS

**INOCULO** grano infetto (40+ chicchi)

**DIMENSIONI** h 350 mm \_ d 180 mm

**SUBSTRATO** canapa + (bio)plastica

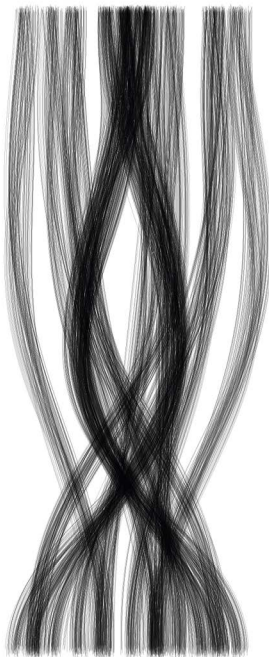
**CRESCITA** | 0  28 |  
giorni

> La simulazione dei fasci della  
configurazione scelta

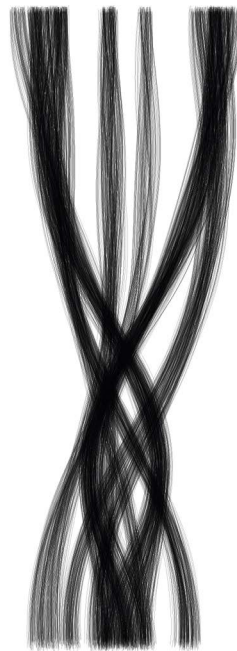
^ Vista frontale e vista laterale del  
sistema di canapa simulato

*pagina a fianco*

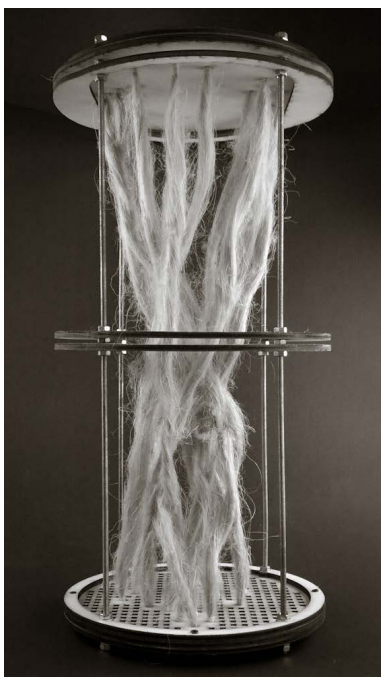
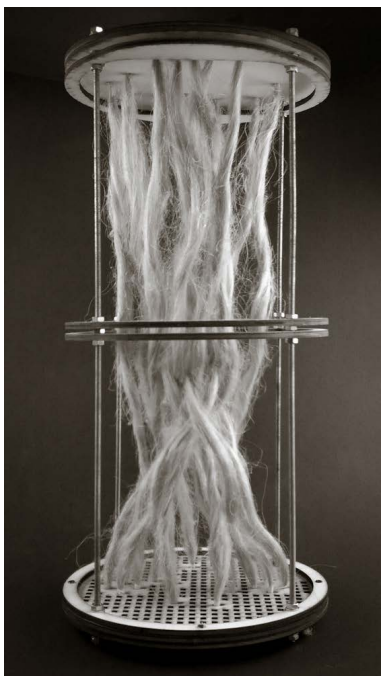
< Il modello reale (#3.3.2), prima e  
dopo la colonizzazione del micelio. Vista  
frontale in alto, vista laterale in basso.



**FRONT**

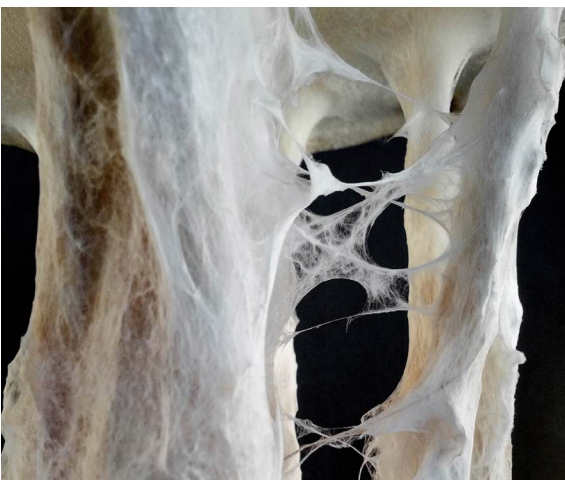


**RIGHT**





\_f76



\_f77

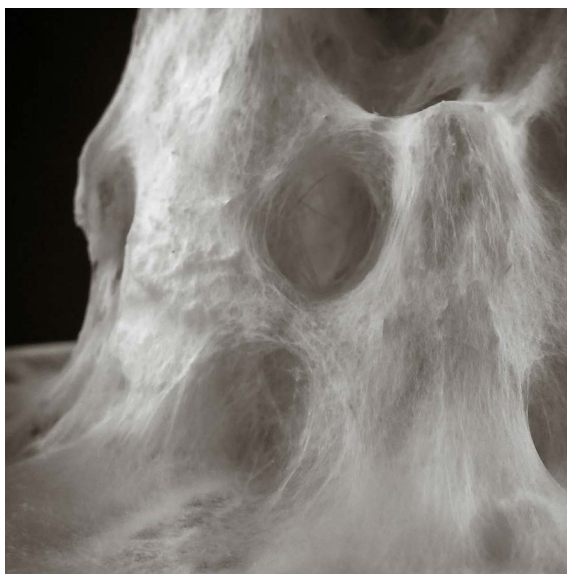
**\_f76** Il micelio ha assecondato la struttura in canapa crescendo ed avvolgendo i fasci di fibre. Le ife aeree hanno creato un volume unico attorno a quei fasci che risultavano essere più ravvicinati.

**\_f77** Le connessioni orizzontali emergono grazie alle ife esplorative. Anche una sola fibra di canapa che si discosta dalla direzione del fascio permette al fungo di aggrapparsi e connettere due parti distanti tra loro anche diversi centimetri.

**\_f78, f79** Si nota come il sistema fibroso di micelio abbia fatto emergere dei vuoti di forma arrotondata. Aggiungendo materia all'articolazione spaziale della canapa, il micelio tende ad uniformare la superficie esterna del volume.



**\_f78**



**\_f79**



\_f80





**\_f81**

**\_f80** Dettaglio di un nodo costruito dal micelio con la piastra di base. L'estetica di queste superfici tese è un carattere emergente dovuto al processo di crescita e alle tensioni interne che si vengono a generare. Il bilanciamento tra l'indole esplorativa e la riconnessione delle ife produce un accrescimento che tende a smussare il carattere irregolare del substrato di partenza.

**\_f81** La complessità dell'articolazione spaziale del sistema mostra differenziazione di densità e permeabilità.



### **CANAPA >**

---

L'INDETERMINAZIONE IMPLICA ANCHE LA POSSIBILITÀ DI ZONE IN CUI IL MICELIO NON CRESCE E LASCIA SCOPERTA LA CANAPA

### **MIDDLE DENSITY >**

---

QUANDO LA DISTANZA TRA LE FIBRE DI CANAPA È SUFFICIENTEMENTE PICCOLA IL MICELIO CREA UN PONTE FITTO E RELATIVAMENTE OMOGENEO

### **HIGH DENSITY >**

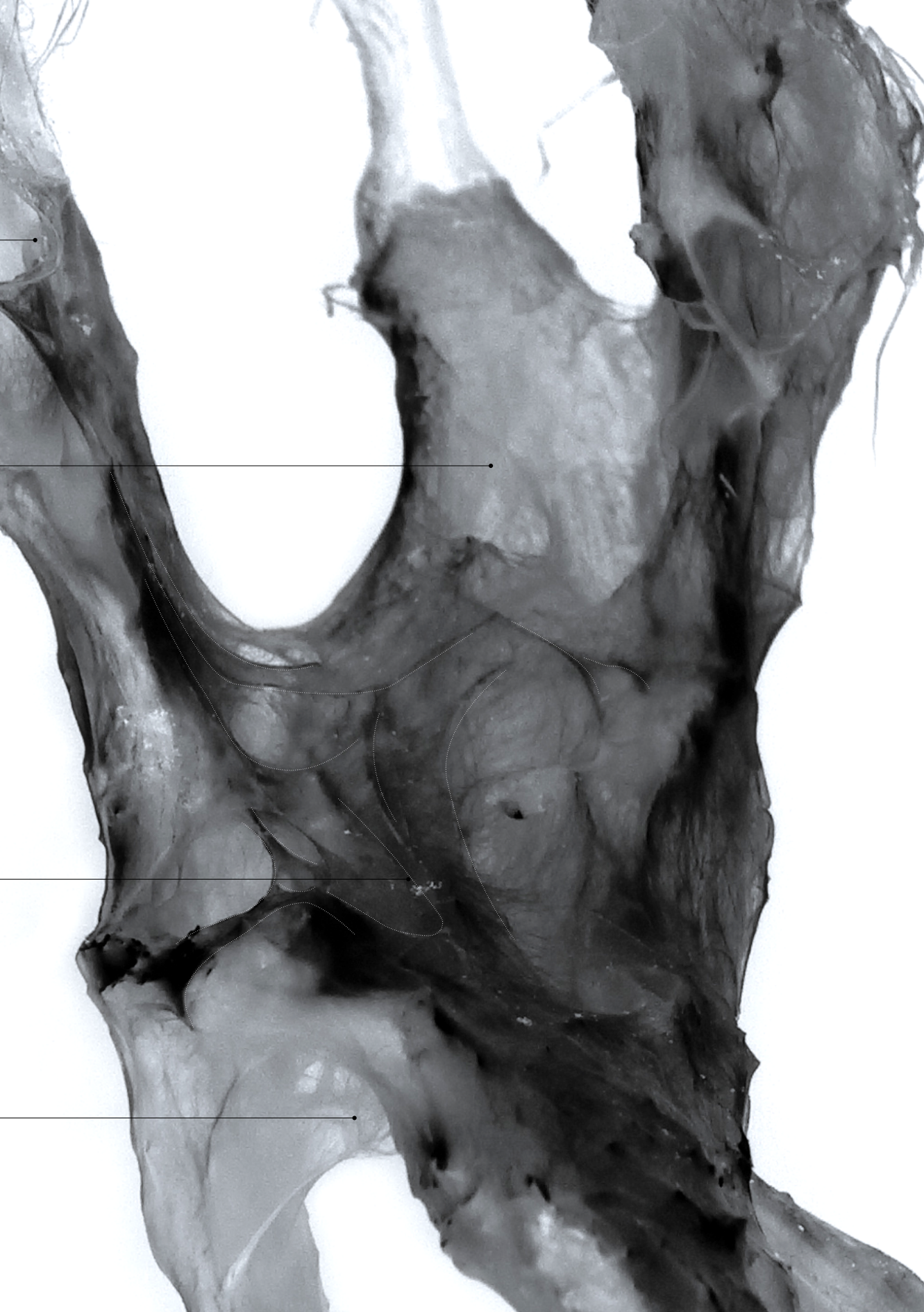
---

DOVE IL SUBSTRATO RISULTA PIÙ FAVOREVOLE IL MICELIO CRESCE FITTO NON SOLO ASSECONDANDO LA DIREZIONE DELLA CANAPA MA PRODUCENDO ANCHE CORDONI MICELIARI

### **LOW DENSITY >**

---

AI CONFINI DI CRESCITA LA DENSITÀ DIMINUISCE. AUMENTA INVECE LA PERMABILITÀ VISIVA.



# gerarchie

^ Il sistema viene discretizzato in tre ordini di comportamenti per creare differenziazione del substrato di partenza pur mantenendo continuità e coerenza *pagina a fianco*

< A seguito dei vari campioni prodotti in piccola scala, la disposizione delle fibre di canapa è stata gerarchizzata in tre famiglie a cui fanno riferimento volumi e densità diverse.

## 1° ordine



> BOTTOM - TOP

> HEMP CABLE

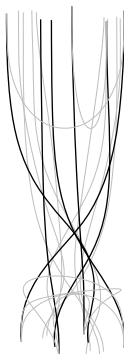
> STRUTTURALE

> HIGH DENSITY

> ORNAMENTALE

.

## 2° ordine



> BOTTOM - TOP

> HEMP CABLE

> HEMP WALL

> MIDDLE DENSITY

> LOW DENSITY

> ORNAMENTALE

.

## 3° ordine



> TOP - TOP

> BOTTOM - BOTTOM

> HEMP CABLE

> HEMP WALL

> MIDDLE DENSITY

> LOW DENSITY

> ORNAMENTALE

.



## Hemp cable

---

La canapa sfilacciata è organizzata in filamenti per formare fasci di circa 10 mm di diametro. Le fibre tendono ad un'unica direzione ma l'alta indeterminazione rende il sistema eterogeneo alla microscala. Con l'aumentare della scala e conseguentemente del numero di fibre, il materiale diviene sempre più ortotropo lasciando a quella indeterminazione un carattere prettamente estetico.

.

---



## Hemp wall

---

La versatilità della canapa sfilacciata permette di disporre il materiale in modo che una dimensione sia nettamente inferiore alle altre due. Si vengono a formare dunque delle superfici la cui curvatura è in funzione del comportamento e delle caratteristiche flessionali del materiale. La densità è variabile con dirette conseguenze circa la permeabilità visiva.

.

---



## Hemp mix

---

La somma di un sistema a fasci con uno tendenzialmente bidimensionale. La densità globale varia sia in funzione della densità dei sistemi costituenti sia in funzione della loro reciproca distribuzione ed interazione. Le implicazioni sulla crescita e sulla morfogenesi del micelio sono notevoli dando origine ad un'alta differenziazione del materiale.

.

---



**2.1-A**  
density > high  
hierarchy > 1+2+3  
variation > uniform  
elements > 18



**2.1-B**  
density > middle  
hierarchy > 1+2  
variation > low  
elements > 14



**2.1-C**  
density > low  
hierarchy > 1+2  
variation > middle  
elements > 14



**2.2-A**  
density > high  
hierarchy > 1+2+3  
variation > uniform  
elements > 19



**2.2-B**  
density > middle  
hierarchy > 1+2  
variation > low  
elements > 14



**2.2-C**  
density > low  
hierarchy > 1+2  
variation > middle  
elements > 14



**2.3-A**  
density > high  
hierarchy > 1+2+3  
variation > uniform  
elements > 18



**2.3-B**  
density > middle  
hierarchy > 1+2  
variation > low  
elements > 18



**2.3-C**  
density > low  
hierarchy > 1+2  
variation > middle  
elements > 18



## esplorazioni

> Su tre macro famiglie si sono variate le gerarchie di canapa in funzione dei vari ordini di comportamento



**\_2.1-D**  
density > middle  
hierarchy > 1+2+3  
variation > high  
elements > 18



**\_2.1-E**  
density > low  
hierarchy > 1+2+3  
variation > middle  
elements > 18



**\_2.2-D**  
density > high  
hierarchy > 1+2+3  
variation > high  
elements > 19



**\_2.2-E**  
density > middle  
hierarchy > 1+2+3  
variation > high  
elements > 19

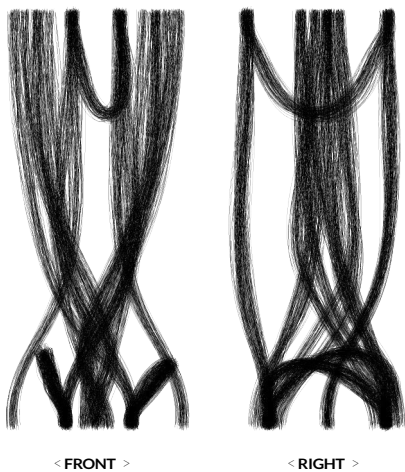


**\_2.3-D**  
density > middle  
hierarchy > 1+2+3  
variation > high  
elements > 18



**\_2.3-E**  
density > low  
hierarchy > 1+2+3  
variation > high  
elements > 18

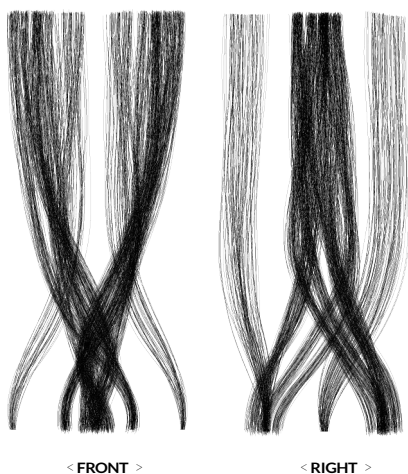
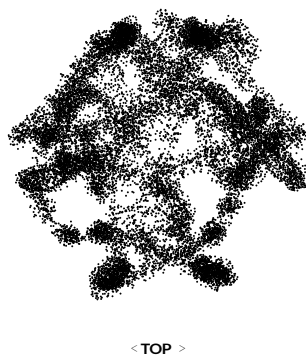




#### DENSITY DISTRIBUTION >

La distribuzione è poco variata perché i fasci di canapa sono di diametro uniforme

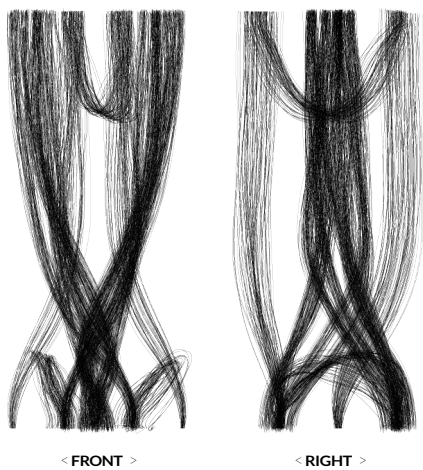
**\_2.3 A**



#### DENSITY DISTRIBUTION >

Un secondo ordine di gerarchia evidenzia una distribuzione di densità più eterogenea

**\_2.3 C**



#### DENSITY DISTRIBUTION >

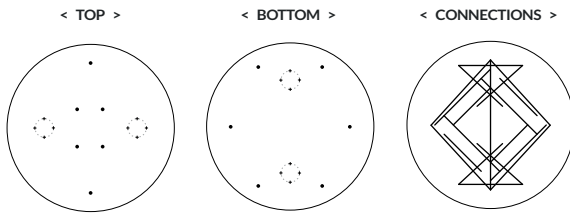
La configurazione più variata è il risultato di tre livelli gerarchici di comportamento del materiale

**\_2.3 E**





**\_f82** Vista prospettica dell'esplorazione \_2.3 E con simulazione a macroscale del volume di micelio



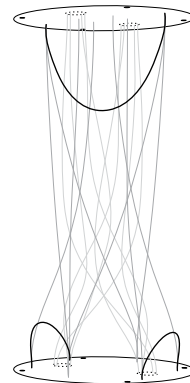
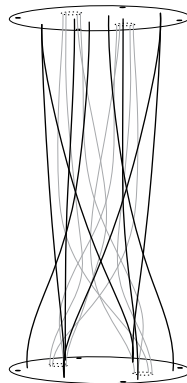
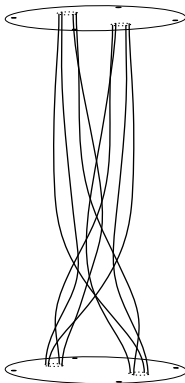
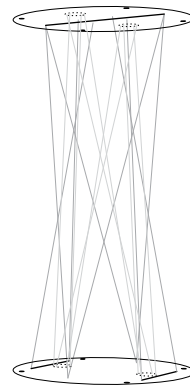
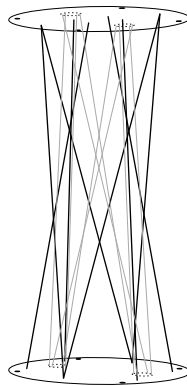
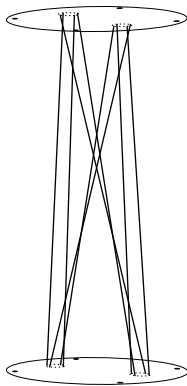
## modello finale

- ^ Prima e dopo la simulazione del rilassamento della canapa
- pagina a fianco*
- < Le gerarchie di canapa con cui si differenziano i tre ordini

### 1° ordine

### 2° ordine

### 3° ordine



20 | .A. CURVE SUB [PT]  
0.6 | .A. PULL STRENGTH [F]  
1000 | .A. STIFFNESS [F]  
50 | .A. BEND STRENGTH [F]  
1.04 | .A. LENGTH DESIRED [%]  
1.04 | .A. FINAL LENGTH [%]

2984 | .B. STIFFNESS [F]  
224 | .B. BEND STRENGTH [F]  
1.01 | .B. LENGTH DESIRED [%]  
1.01 | .B. FINAL LENGTH [%]

2353 | .C. STIFFNESS [F]  
203 | .C. BEND STRENGTH [F]  
2.0 | .C. LENGTH DESIRED [%]  
1.81 | .C. FINAL LENGTH [%]



# Analisi

> Descrizione delle gerarchie di canapa in relazione alla morfologia del modello finale

*pagina a fianco*

< Viste frontali e distribuzione di densità in pianta

## GERARCHIA 2 >

ALCUNI FASCI DI FIBRE NON SONO PRETTAMENTE STRUTTURALI QUANTO PIUTTOSTO ORNAMENTALI E A COMPLETAMENTO

## GERARCHIA 1 >

FASCI DI FIBRE CHE SEGUONO L'ANDAMENTO DEGLI SFORZI E COSTITUISCONO UN CORE STRUTTURALE

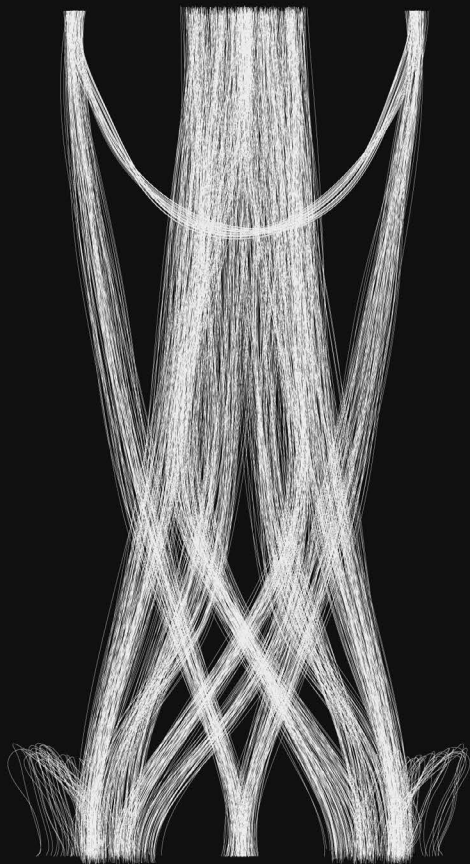
## < GERARCHIA 2

LE FIBRE SONO DISPOSTE A FORMARE UNA PARETE BIDIMENSIONALE. IL VOLUME AUMENTA MENTRE LA DENSITÀ DIMINUISCE DIFFERENZIANDO LE FIBRE

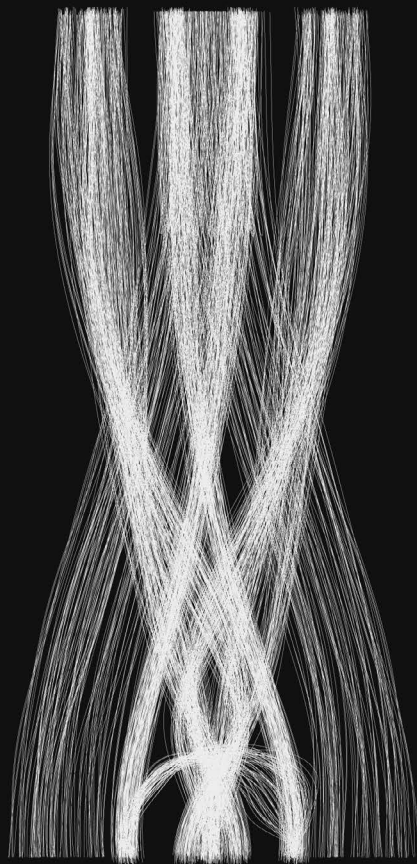
## < GERARCHIA 3

FIBRE LOCALIZZATE IN CUI GLI ESTREMI RIMANGONO NEL PIANO, A COMPLETAMENTO E ORNAMENTALI

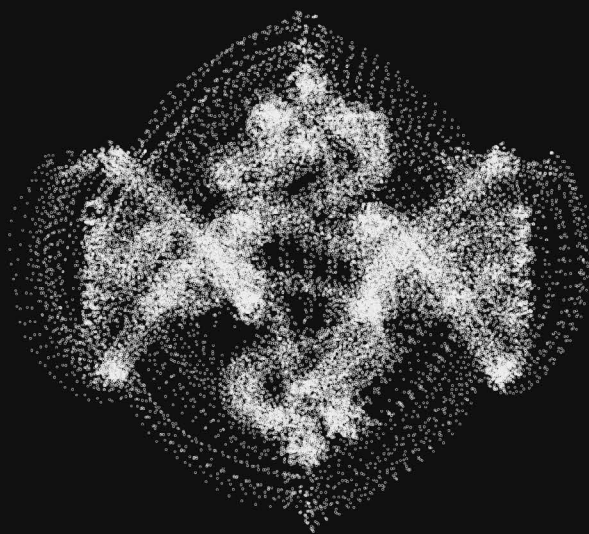




< FRONT >



< RIGHT >



< DENSITY DISTRIBUTION >





< FRONT >



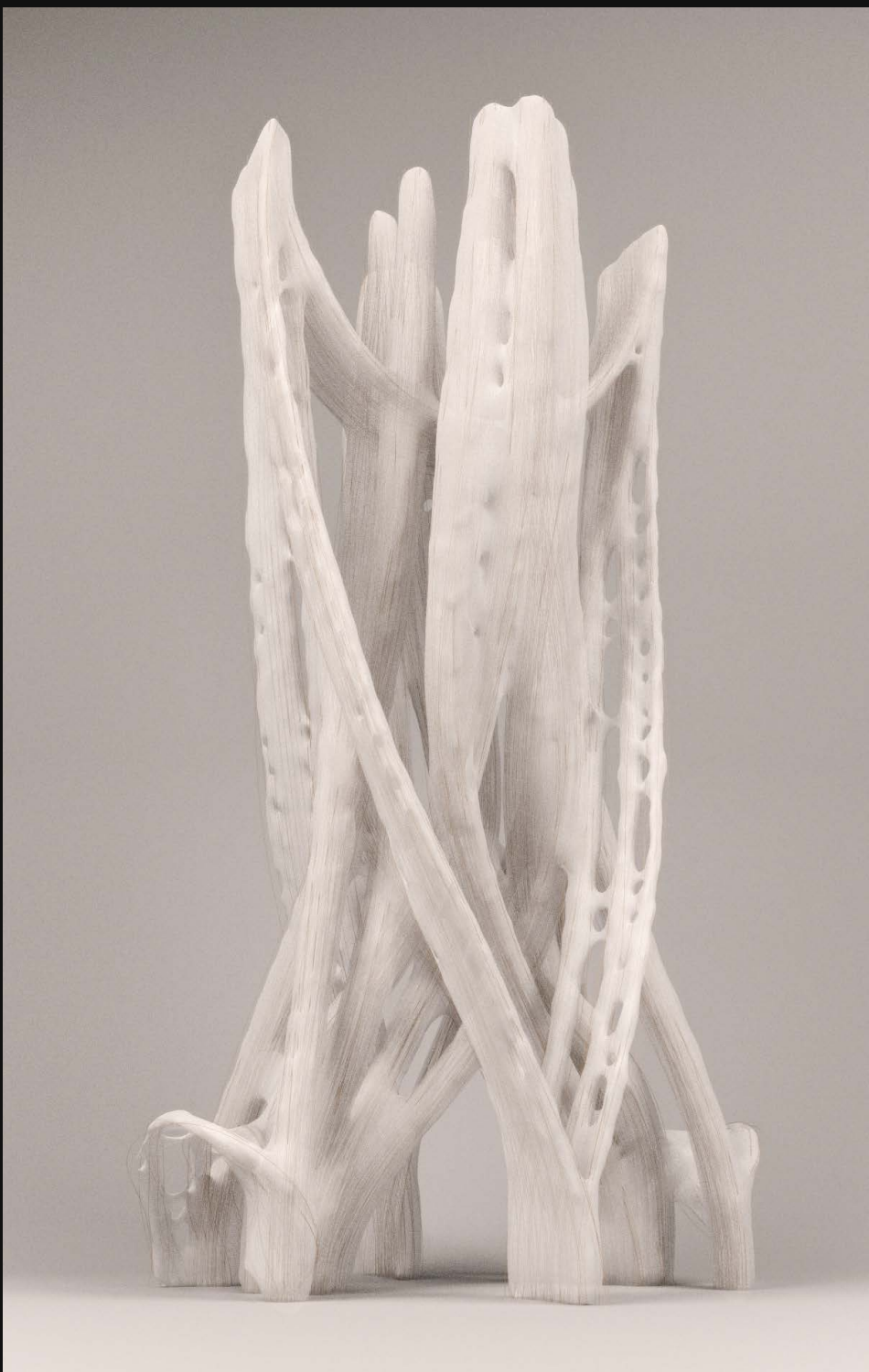
< RIGHT >



< LEFT >



< BACK >

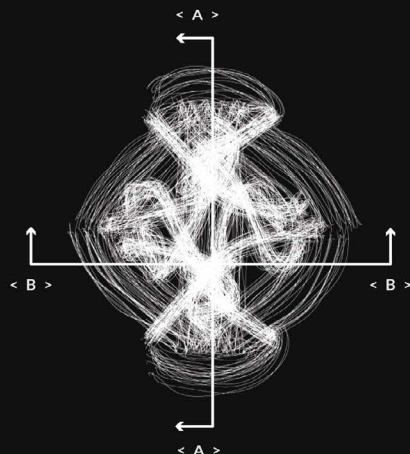
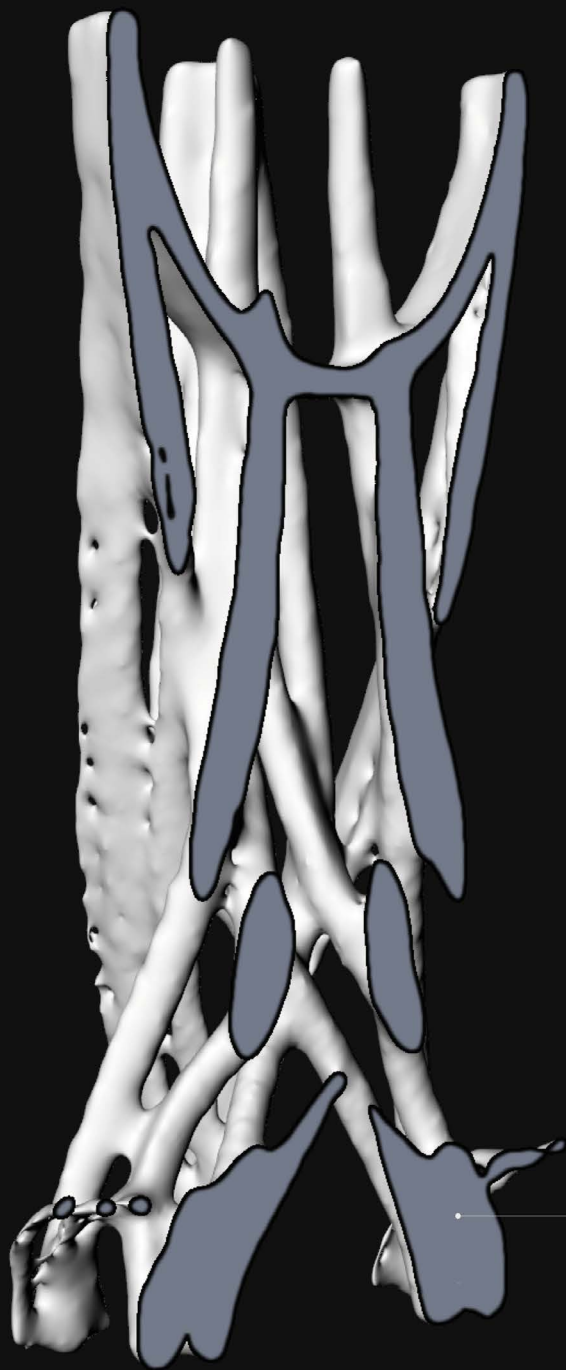


\_f83 Vista prospettica renderizzata, simulazione a macroscale del volume di micelio



< SEZIONI >

SEZIONI ORIZZONTALI DEL MODELLO  
OGNI 25mm DI ALTEZZA



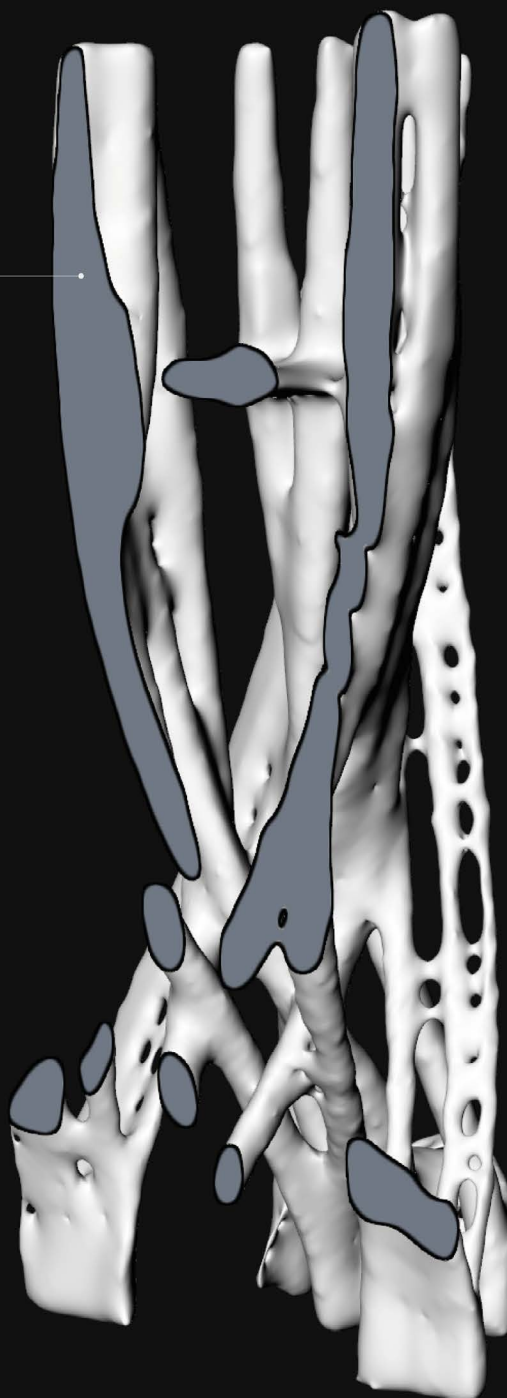
< SEZIONE A-A >

NONOSTANTE LA COMPLESSA  
ARTICOLAZIONE DEL MODELLO, LA  
SEZIONE MOSTRA COME IN REALTÀ CI  
SIANO DEI PIANI DI SIMMETRIA



**SEZIONE B-B >**

LE FIBRE CHE SEGUONO IL PRIMO ORDINE  
DI COMPORTAMENTO TENDONO AD  
ESSERE PIÙ DENSE E A FORMARE  
AGGLOMERATI PIÙ CONSISTENTI





# living fiber 02

## TOP >

DUE DISCHI ACCOPPIATI BLOCCANO LA CANAPA "WALL". LE FORATURE INVECE PERMETTONO IL PASSAGGIO DELLA CANAPA "FUNE".

## DISCO SUPPLEMENTARE >

SERVE DA SOSTEGNO PER IL COTONE IDROFILO IMBEVUTO D'ACQUA

## SOSTEGNI INTERMEDI >

DUE DISCHI INTERMEDI IRRIGIDISCONO IL TELAIO CONTRASTANDO LE DILATAZIONI TERMICHE DOVUTE ALL'AUTOCLAVE. SERVONO ANCHE DA SOSTEGNO PER IL COTONE

## BASE >

TRIPLO STRATO DI PIOPPO DA 4 MM CON FORATURE CIRCOLARI E RETTANGOLARI PER IL PASSAGGIO DELLA CANAPA

## < COTONE IDROFILO

IN QUESTI PUNTI VIENE INSERITO DEL COTONE IDROFILO IMBEVUTO D'ACQUA IN MODO DA ASSICURARE L'UMIDITA' DURANTE TUTTO IL PROCESSO DI CRESCITA

## < BARRE FILETTATE

4 BARRE FILETTATE CON I RELATIVI DADI SERVONO PER CREARE LA STRUTTURA IN CUI COSTRUIRE IL MODELLO DI CANAPA

## < FORATURE

LE FORATURE ALLA BASE SERVONO PER FARE PASSARE L'UMIDITA'

**SAMPLE #3.3.3**

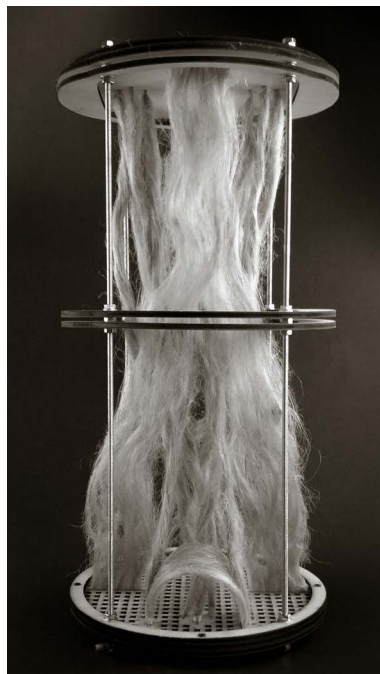
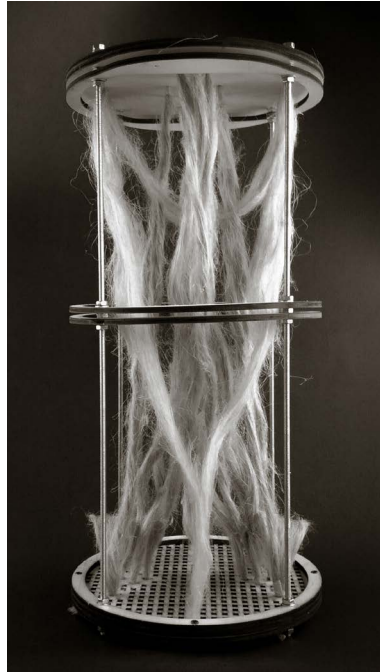
PLEUROTUS OSTREATUS

**INOCULO** grano infetto (40+ chicchi)

**DIMENSIONI** h 350 mm \_ d 180 mm

**SUBSTRATO** canapa + (bio)plastica

**CRESCITA** | 0 ————— 30 |  
giorni







**\_f84** Il modello si propone come soluzione continua in cui sono facilmente riconoscibili le transizioni repentine tra le condizioni di maggiore e minore densità

**\_f85\_f86** Il micelio prende decisioni autonome nel processare il substrato. La simmetria del sistema è ancora percepibile anche se contaminata dalle scelte costruttive del micelio.

**\_f85**



**\_f86**





\_f86

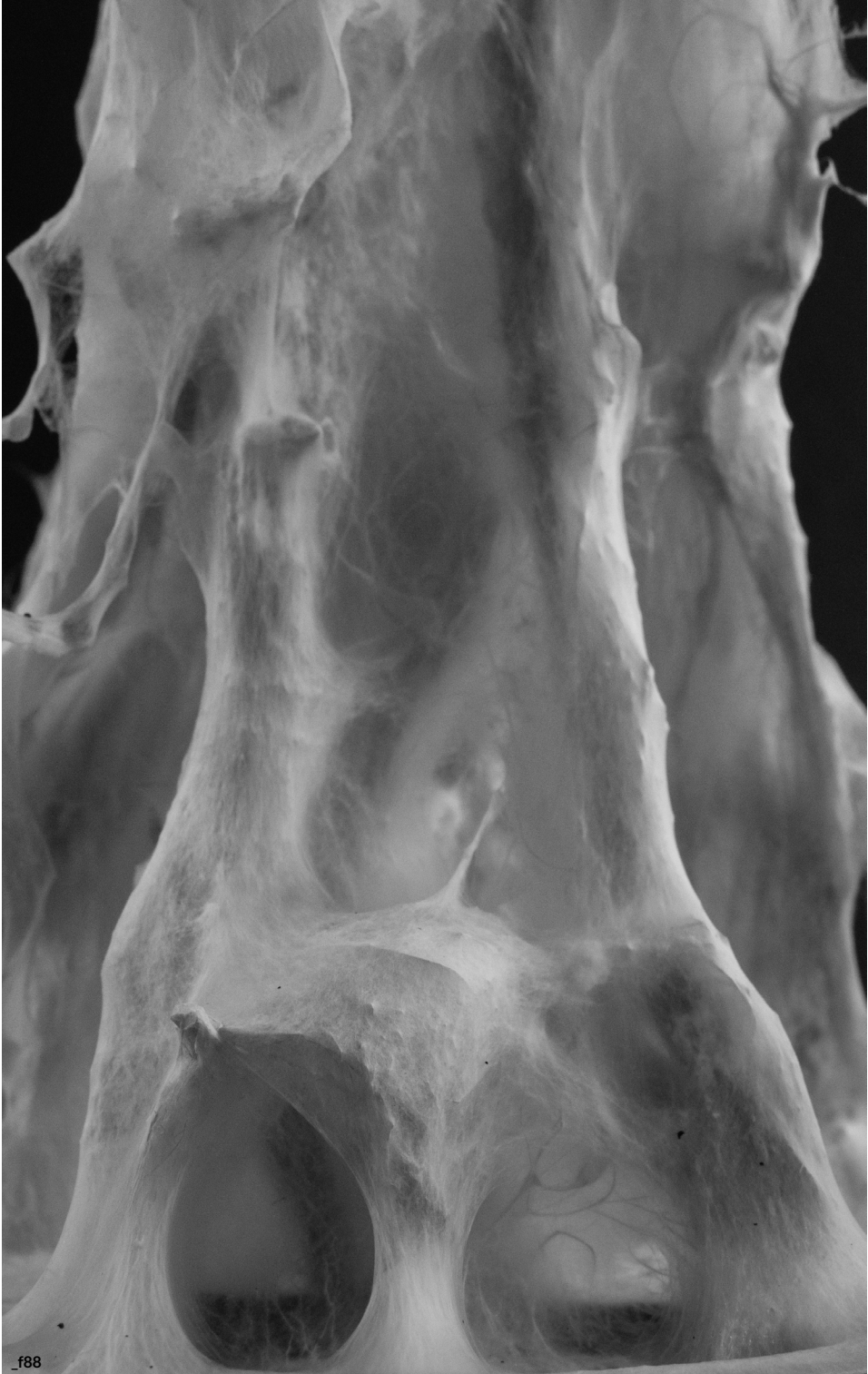


\_f87

**\_f86** Particolare che evidenzia la continuità della superficie esterna creata dal micelio oltre ad una differenziazione di orientamento e densità.

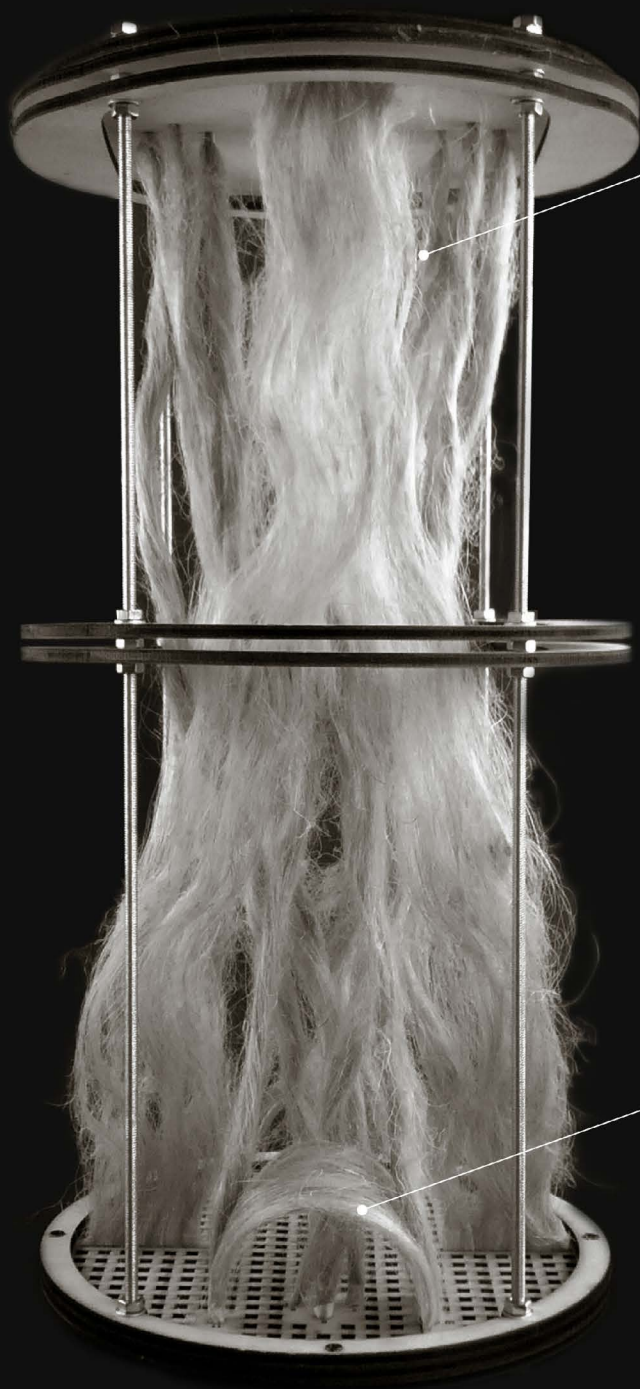
**\_f87** La tensione interna che si viene a generare durante la crescita innesca processi di *formfinding*

**\_f88** I fasci di canapa si percepiscono ancora ma non sono più elementi discreti, si trasformano e mutano a seconda delle condizioni locali del sistema.





## analisi costruttive

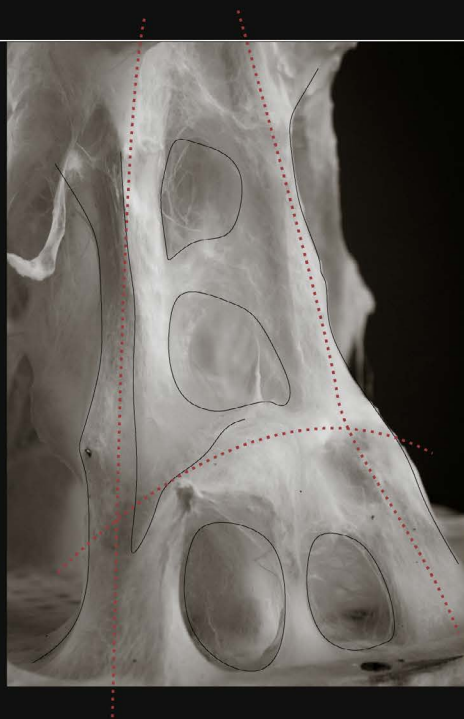
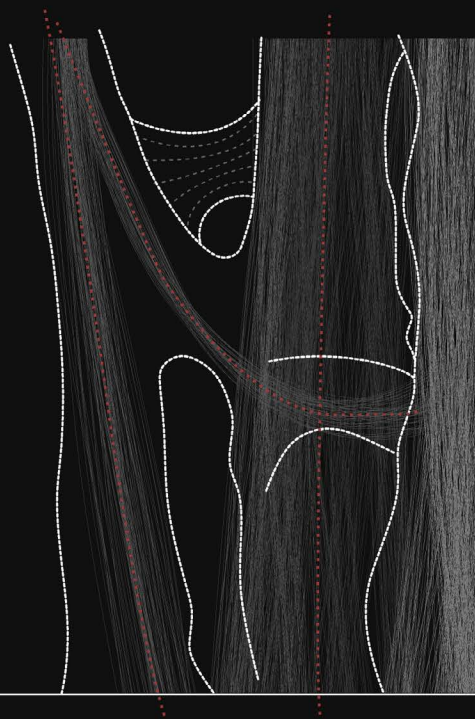


### LOW DENSITY

In una condizione in cui la canapa si presenta in un assetto più variabile e caotico, dovuto alla terzo ordine comportamentale studiato, il micelio è cresciuto in maniera molto variabile. Si percepiscono i cambi di densità nonché le connessioni ex-novo che è riuscito a costruire.

### HIGH DENSITY

La gravità inizia ad avere una influenza maggiore mano a mano che il micelio cresce. Le parti più in basso del modello risultano pertanto più compatte e dense. Lo schema mostra come il volume finale della superficie occupata dal micelio sia abbondantemente maggiore rispetto a quella iniziale della canapa.

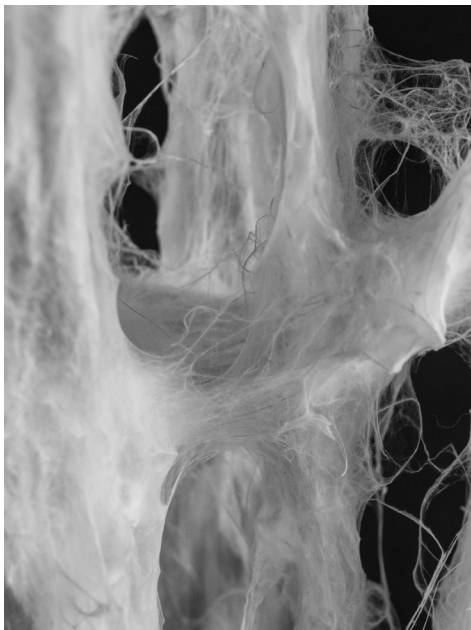




\_f89



\_f90



\_f91





\_f92



\_f93

**\_f89** Il concetto di indeterminazione si evidenzia maggiormente in quelle porzioni di modello che appaiono più caotiche. Emergono dunque delle singolarità ponti aerei connettivi e auto-organizzazioni circolari.

**\_f90** Il micelio contamina anche le piastre di base mediando il punto di contatto tra la struttura e il supporto.

**\_f91** Dove i fasci di canapa sono sufficientemente ravvicinati il micelio avvolge tutta la struttura dando origine ad una superficie esterna densa e rigida.

**\_f92** Si nota come il sistema fibroso di micelio abbia fatto emergere dei vuoti di forma arrotondata. Aggiungendo materia all'articolazione spaziale della canapa, il micelio tende ad uniformare la superficie esterna del volume.



## conclusioni

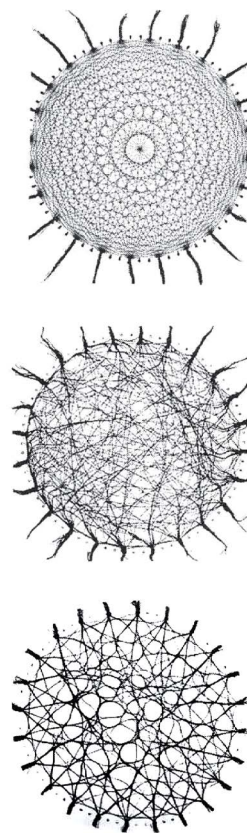
---

Come ampiamente emerso dalle varie fasi di lavoro, mycelium tectonics tende a concepire un'architettura estremamente pragmatica e materica, contaminata però dalla complessità dei sistemi non-lineari, rappresentati qui dalla crescita del micelio. Il concetto di vita è strettamente legato ai sistemi materiali: non solo come percezione o empatia dello spazio costruito quanto piuttosto nell'idea di vita racchiusa nelle caratteristiche fisico-chimiche della materia. Una veicolata intelligenza che struttura, organizza, si muove e si conforma; perché una materia che si auto-organizza, e riesce a processare informazioni per potersi adattare a determinate condizioni o stimoli esterni, è una materia che vive.

Trovo questa vitalità estremamente presente nelle ricerche di Frei Otto e in quei processi di computazione analogica<sup>1</sup> che contraddistinguono i suoi lavori. Lo studio sui fili di lana (f94), ad esempio, era suddiviso in tre fasi. La prima era unicamente caratterizzata dalla geometria, senza che il materiale influisse in alcun modo. La materialità entrava in gioco con la seconda fase, per poi tornare in uno stato geometrico nella terza dove la geometria però non veniva più imposta sul materiale. *Living fiber* ricalca questo modo di procedere rielaborando le tre fasi appena descritte: la prima diviene una fase geometrico estensiva (l'individuazione di un volume, dei confini, dei piatti, dei punti e le connessioni di questi punti), segue una fase materico-organizzativa (l'allungamento e il rilassamento delle fibre di canapa come substrato tridimensionale) e infine una fase generativa ri-organizzativa (la crescita del micelio).

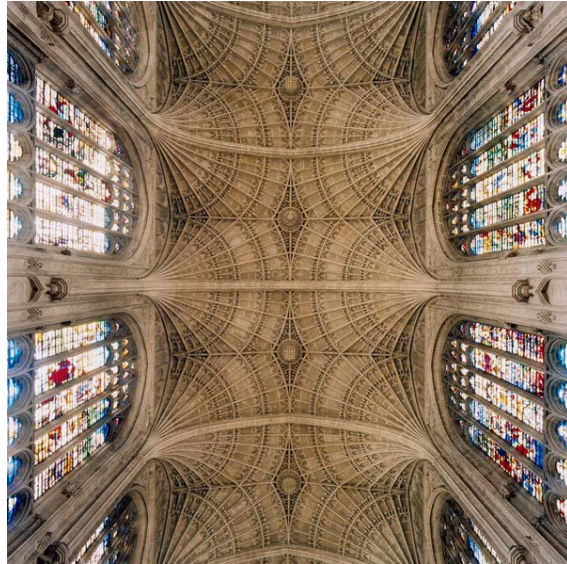
Quello che è innovativo qui è che la ri-organizzazione (terza fase) non avviene tramite operazioni inanimate che sfruttano proprietà fisico-chimiche dei materiali, bensì tramite l'introduzione di un organismo vivente, che processa ed elabora costantemente una serie di variabili differenti prendendo decisioni autonome. Il concetto di vita non è più solo contenuto nella materia; è reale e presente nell'attività generativa delle ife, così come lo è nelle interazioni e nelle regole degli agenti simulati<sup>2</sup>.

Il sistema nasce dunque come euclideo ma si evolve in un sistema continuo dove non è più possibile individuare chiaramente confini o dimensioni degli elementi. Il risultato è una architettura "caotica" ed imprevedibile non più assemblata da elementi discreti, ma caratterizzata dal concetto di va-



**f94** Frei Otto e Marek Kolodziejczyk (ILS) fecero esperimenti con la lana bagnata. Consisteva in un telaio in cui tutti i punti appartenenti alla circonferenza esterna venivano connessi tra loro. Successivamente veniva aumentata la loro lunghezza di un 8% per poi immergere tutto il telaio in acqua. I fili avranno così la tendenza ad attaccarsi tra loro creando strutture più solide ma anche dei vuoti più ampi rispetto alla condizione iniziale.

\_f95  
**KING'S COLLEGE CHAPEL**  
 Cambridge, England, 2006  
 David Stephenson



ghezza e dalle singolarità che emergono laddove il sistema è capace di evolversi.

Quando una struttura biologica si sviluppa da sola non lo fa tramite l'addizione, ma tramite l'aggregazione: essa irrompe nella singolarità, rendendo la struttura espressiva ed empatica. I livelli gerarchici vengono generati uno dopo l'altro dal continuo, proprio come accade nelle colonne gotiche, che s'innalzano dal suolo come un fascio di nervi teso verso l'alto, per poi aprirsi ed intrecciarsi tra di loro dando origine alle "volte". Sono i vari stati d'aggregazione a generare le singolarità (colonna, ventaglio, volta) che non appaiono dunque come elementi discreti ma emergono dalle relazioni, ossia dal continuo. In questo processo di emersione è complice tanto il sistema continuo quanto il concetto di vaghezza (o indeterminazione) che caratterizza il sistema<sup>3</sup>.

Come scrive Lars Spuybroek: "Il continuo è parte del dominio delle cose reali, e pertanto è necessariamente vago essendo uno e molti allo stesso tempo. Se non ci fosse continuità tra gli elementi non ci potrebbe essere neppure alcuna azione che spinga la materia a trovare la propria forma. Se non ci fosse continuità all'interno delle forme naturali, non ci potrebbe essere evoluzione. E se non ci fosse continuità nella tettonica, non ci potrebbe essere alcun salto tra una scala e l'altra. [...] Nel continuo viene incluso ogni cosa, tanto i singoli oggetti quanto i rapporti che li legano."

La tettonica dunque viene esplicitata attraverso il processo di emersione delle singolarità e non ha quindi più senso parlare di dicotomia tra struttura ed ornamento. In questo senso si può dire che la decorazione debba diventare strutturale, così come la struttura, ornamentale.

*Living fiber* mostra difatti una estetica brutale ma estremamente affascinante, soprattutto nella transizione tra quelle parti incredibilmente caotiche a quelle invece più rigorose, pulite e tese.

/1 Frei Otto sviluppò modelli capaci di liberare la materia (concepita fino a quel momento come elemento passivo che riceve una determinata forma), alla ricerca di una *propria* forma (Formfindung). Queste metodologie empiriche sono state definite "elaborazione analogica", da cui computazione analogica.

/2 Si fa riferimento al capitolo 1.3 - *intelligenze collettive*

/3 Con vaghezza o indeterminazione si intende quella capacità di un sistema di dare origine ad un imprevisto e quindi ad una singolarità all'interno di quel campo differenziato di vettori e tendenze che identificano gli obiettivi e gli intenti progettuali.

/4 Queste sono state le dimensioni dell'autoclave, quelle della cappa a flusso laminare sotto cui si è lavorato e quelle del termoregolatore in cui si riponevano i modelli durante tutto il periodo di crescita.

I limiti di questo percorso di ricerca sono ad ogni modo evidenti. Il più visibile è certamente la questione della scala. Come espresso più volte, il concetto di scala è fondamentale; ancor di più quando le caratteristiche del sistema tendono a cambiare o ad essere imprevedibili. Per quanto si sia cercato di avere un approccio multi-scalare, non si è riusciti a svalicare i limiti imposti dalle dimensioni degli strumenti utilizzati<sup>4</sup>. Ad ogni modo, non credo che questo studio possa realizzarsi alla scala dell'edificio, forse neanche a quella del padiglione. E allora verrebbe da chiedersi il senso di un lavoro architettonico costretto alla scala dell'oggetto da tavolo. A questa critica si risponde citando nuovamente Spuybroek: "Una teoria della materia non ha certo bisogno di essere applicata agli edifici, quanto piuttosto all'organizzazione del costruire; e organizzazione equivale a dire -architettura-non-edificio-".

Gli strumenti digitali e di simulazione sono la cerniera che permettono di estendere il sistema verso una condizione più flessibile, con la possibilità di rimanere fedeli e coerenti alla tettonica del micelio. In tal senso, questa tesi, affronta un aspetto molto contenuto. Non è stato possibile rielaborare il modello di studio nello spazio virtuale della simulazione a causa di un duplice aspetto: da un lato la complessità e le tempistiche che sarebbero state necessarie, dall'altro l'enorme potenza di calcolo che sarebbe servita per poter indagare nel complesso le potenzialità del sistema coerentemente al modello fisico.

L'architettura del continuo necessita di questi passaggi e la tecnologia sarà sempre più un aspetto imprescindibile per il progettista. Per affrontare questa realtà è necessario comprendere che il computer non è altro che uno strumento, e come ogni strumento bisogna approcciarsi tenendo ben presente le potenzialità e i limiti di ciò che si usa. Bernard Cache sosteneva che anche il righello e il compasso erano una forma molto semplice di computer. Utilizzare le macchine odierne per fare semplicemente quello che è possibile fare con altri strumenti non è l'approccio giusto con cui si dovrebbe guardare alla tecnologia. Non esistono strumenti neutri e nessuno strumento dovrebbe essere separato dai propri obiettivi, perché non si può lavorare con un computer senza sforzarsi di pensare come un computer.

*mycelium tectonics* è rimasto debole dal punto di vista computazionale ed uno studio più approfondito avrebbe certamente permesso di estendere il sistema a scale differenti e materiali differenti. Rimane però inderogabile quanto l'esplorazione delle possibili interazioni tra materia e miceli sia servito come stimolo di riflessione circa i limiti che intercorrono tra design e funzionalità, nonché le evidenti implicazioni in termini di estetica e valore architettonico.



\_f96

#### LIVING FIBER 02

Dettaglio di connessione con la piastra di base





# **bibliografia**

---

## **LIBRI**

- \_j00** Benyus, Janine M. – “Biomimicry, Innovation inspired by nature” – HarperPerennial, 1997
- \_j01** De Landa, Manuel - “Mille anni di storia nonlineare. Rocce, germi e parole”, Instar Libri, 1999
- \_j02** Johnson, Steven – “Emergence” – scribner, 2004
- \_j03** Mancuso, Stefano; Viola, Alessandra - “Verde brillante, Sensibilità e intelligenza del mondo vegetale”, Giunti Editore, 2013
- \_j04** Reiser + Umemoto – “Atlas of novel tectonics” – Princeton Architectural Press, 2006
- \_j05** Ross, Philip – “BioTechnique” – Yerba Buena Center of the Arts, 2007
- \_j06** Shiffman, Daniel – “The Nature of Code” – Magic Book Project, 2012
- \_j07** Stamets, Paul – “Myceliym Running: How Mushrooms Can Help Save the World” – Ten Speed Pr, 2005
- \_j08** Thomson, D'Arcy Wentworth – “On growth and form” – Dover Publications; Revised, Complete edition (June 23, 1992), 1945
- \_j09** Spuybroek, Lars - “L'architettura del continuo” - Deleyva Editore, 2013

## **ARTICOLI SCIENTIFICI**

- \_a00** Asep, Hidayat; Sanro, Tachibana – “Characterization of polylactic acid (PLA)/kenaf composite degradation by immobilized mycelia of *Pleurotus ostreatus*”, 2012
- \_a01** Barlow , Peter W.; Fishan, Joachim - “Swarms, swarming and entanglements of fungal hyphae and of plant roots”, 2013
- \_a02** Boswell; Jacobs; Gadd; Ritz; Davidson – “A mathematical approach to studying fungal mycelia”, 2003
- \_a03** Boswell; Jacobs; Gadd; Ritz; Davidson – “The Development of Fungal Networks in Complex Environments”, 2006
- \_a04** Davidson, A.; – “Mathematical modelling of mycelia: a question of scale”, 2007
- \_a05** Glass, N. Louise; et al. – “Hyphal homing, fusion and mycelial interconnectedness”, 2004
- \_a06** Heaton, Luke; et al.- “Analysis of fungal networks”, 2012
- \_a07** Hidayat, Asep; Tachibana, Sanro – “Characterization of polylactic acid (PLA)/kenaf composite degradation by immobilized mycelia of *Pleurotus ostreatus*”, 2012
- \_a08** Hopkins, Steven; et al. – “A Hybrid Mathematical Model of Fungal Mycelia: Tropisms, Polarised Growth and Application to Colony Competition”, 2011
- \_a09** Iuri Emmanuel de Paula Ferreira; et al. – “Modelling fungus dispersal scenarios using cellular automata”, 2012

- \_a10 Meskauskas, Audrius; et al. – “Simulating colonial growth of fungi with the Neighbour-Sensing model of hyphal growth”, 2004
- \_a11 Pereira, Cristina Silva; et al. – “Effect of fungal colonization on mechanical performance of cork”, 2006
- \_a12 Rayner, A.D.M.; Watkins, Z.R. and Beeching, J.R. – “Self-integration – an emerging concept from the fungal mycelium”, 1999
- \_a13 Tlalka, M; et al. – “Emergence of self-organised oscillatory domains in fungal mycelia”, 2007

## ARTICOLI / TESI

- \_t00 Frampton, Kenneth - “Rappel à l'ordre: The Case For The Tectonic”, 1990
- \_t01 Gutschow, Kai K. - “Restructuring Architecture's History: Historicism in Karl Bötticher's Theory of Tectonics”, Carnegie Mellon University, 2000
- \_t02 Hensel, Michael - “Computing self-organisation: environmentally sensitive growth modelling”, AD architectural design V.76, March/April 2006
- \_t03 Maulden, Robert - “Tectonics in Architecture: From the Physical to Meta-Physical”, MIT, 1986
- \_t04 McCoy, Christina - “Tectonics in the Twenty-first Century: The Expanded Notion of Structure and Its Perception in Architecture”, University of Cincinnati, 2009
- \_t05 Travaglini; Noble; Ross; Dharan – “Mycology Matrix Composites Proceedings of the American Society for Composites—Twenty-Eighth Technical Conference”, 2013
- \_t06 Shumacher, Patrich - “Tectonics - The Differentiation and Collaboration of Architecture and Engineering”, 2012
- \_t07 Snooks, Roland - “Volatile Formation”, 2012
- \_t08 Snooks, Roland - “Fibrous Assemblages and Behavioral Composites”, The Funabulist Papers 25, 2012
- \_t09 Weinstock, Michael - “Self-organisation and the structural dynamics of plants”, AD architectural design V.76, March/April 2006
- \_t10 Wiscombe, Tom - “Beyond assemblies: system convergene and multi-materiality”, 2012

## INTERNET

- \_i00 <http://www.ecovatedesign.com/>  
Ecovative Design
- \_i01 <http://www.mycoworks.com/>  
Mycoworks
- \_i02 <http://bugs.bio.usyd.edu.au/learning/resources/Mycology/contents.shtml>  
Fungal Biology – University of Sydney, 2004
- \_i03 <http://www.botany.hawaii.edu/>  
Department Of Botany, College of Natural Sciences, University of Hawai'i at Manoa
- \_i04 <http://www.ilmondodeifunghi.it/>  
Sandro Ascarelli, il mondo dei funghi, 2013
- \_i05 <http://www.plethora-project.com/>  
Jose Sanchez, Plethora Project
- \_i06 <http://www.processing.org/>  
Ben Fry and Casey Reas, Processing

- \_i07** <http://www.mediamatic.net/search/101422/en>  
Mediamatic bio industry, Amsterdam
- \_i08** <http://www.corpuscoli.com/>  
Maurizio Montalti | Officina Corpuscoli, Amsterdam
- \_i09** <http://www.red3d.com/cwr/boids/>  
Craig Reynolds | Boids algorithm

## VIDEO

- \_v00** [http://www.ted.com/talks/paul\\_stamets\\_on\\_6\\_ways\\_mushrooms\\_can\\_save\\_the\\_world](http://www.ted.com/talks/paul_stamets_on_6_ways_mushrooms_can_save_the_world)  
Paul Stamets: 6 ways mushrooms can save the world @ TED, 2008
- \_v01** <https://www.youtube.com/watch?v=7q5i9poYc3w>  
Philip Ross @ Parsons The New School for Design, 2014
- \_v02** <http://vimeo.com/32898374>  
Theo Spyropoulos @ ETH CAAD Lectures, 2011



# Ringraziamenti

---

A colei cui voglio dedicare questo lavoro, mia mamma, prima fra tutti a credere nel mio futuro e nelle mie capacità. Grazie. Ringrazio poi mio papà che con i silenzi mi ha dimostrato altrettanta fiducia e mi ha permesso di arrivare fin qui.

Grazie ad Alessio, per i tanti momenti di confronto - ma anche conforto - avuti in questi anni. Se ho trovato una mia personale indirizzo di indagine architettonica è stato soprattutto grazie ai tuoi insegnamenti.

Voglio ringraziare la Prof.ssa Zambonelli, Federica Piattoni, Mirco Iotti, Pamela Leonardi, Matteo Montanari e tutto il centro di Micologia applicata della Scuola di Scienze Agrarie. Ho trovato un team di persone disponibili, capaci e professionali che mi hanno dimostrato sempre piena fiducia nonostante i miei esperimenti apparissero strani e difficili da comprendere. Grazie per avermi accolto e aver dimostrato che le connessioni all'interno dell'Università di Bologna possono realmente funzionare.

Ringrazio Maurizio, per avermi ricevuto ad Amsterdam con interesse e curiosità. Grazie per le lunghe chiacchierate e i numerosi consigli: sono stati un forte stimolo per portare a termine il lavoro con successo.

I want to thank Philip for his valuable advice, thank you for having listened to my many questions and opened my mind to the possibilities of what might be done with the fungi.

Ringrazio l'esperienza in MCA, per l'intenso periodo di lavoro e di confronto condiviso con i colleghi. Un grazie a chiunque abbia speso tempo e parole, anche a quattrocchi, per discutere sull'argomento di tesi al tempo ancora incerto.

Ringrazio i ragazzi di MakeInBo, perché senza la bella realtà che abbiamo costruito questo lavoro non sarebbe stato la stessa cosa.

Ringrazio i miei familiari, nonna Lissi, nonna Mara, zia Marisa, zia Claudia, zia Bettina, zio Marco e zia Lisetta per la loro vicinanza in ogni momento, in ogni stagione, in ogni periodo. Grazie ai miei tre fratelli Matteo Federico e Francesco a cui auguro un mondo di bene.

Ringrazio Alberto per la sua pazienza e presenza, da quando ci sei tu è tutto estremamente più sereno.



